

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**TEPLOTNÍ ZÁVISLOST PMD**

TEMPERATURE DEPENDENCE OF PMD

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jakub Drábek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Münster, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Jakub Drábek

**ID:** 164592

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Teplotní závislost PMD

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište disperze v optickém vlákne a jejich vliv na telekomunikační přenos. Realizujte dlouhodobá měření PMD v optickém vlákne. Pro zpracování a vyhodnocení výsledků vytvořte skript v MATLABu. Pro konkrétní časy měření zjistěte teplotu v dané lokalitě a diskutujte vztah mezi PMD a teplotou.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] EDITED BY ANDREA GALTAROSSA, Curtis R. Polarization Mode Dispersion. New York, NY: Springer Science Business Media, Inc, 2005. ISBN 978-038-7263-076.

[2] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá popisem problematiky polarizační vidové disperze – PMD. Velikost zpoždění PMD je náhodná veličina, která je proměnná v čase. Při provozu vysokých přenosových rychlostí na optických trasách představuje jeden z hlavních problémů optického vlákna. Hodnotu PMD ovlivňuje mnoho různých okolních vlivů například teplota, a proto se měření PMD stalo standardem při nasazování vysokorychlostních optických sítí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Optické vlákno, disperze, kompenzace PMD, PMD, Polarizační vidová disperze, měření PMD, zpoždění

## **ABSTRACT**

Bachelor thesis describes the problems of polarization mode dispersion-PMD. Size of the delay PMD is a random variable that varies in time. When operating at high data rate communication links is one of the major problem of the optical fiber. PMD value affects many different environmental influences as temperature, and therefore the measurement of PMD become standard in deploying high-speed optical networks.

## **KEYWORDS**

optical fiber, dispersion, PMD compensation, PMD, Polarization mode dispersion, measuring PMD, delay

DRÁBEK, Jakub *Závislost PMD na okolní teplotě*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 66 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Závislost PMD na okolní teplotě“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....  
podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Optická vlákna</b>	<b>13</b>
1.1 Druhy optických vláken . . . . .	13
1.1.1 Mnohovidová optická vlákna . . . . .	14
1.1.2 Jednovidová optická vlákna . . . . .	15
1.2 Disperze u optických vláken . . . . .	16
<b>2 Polarizační vidová disperze–PMD</b>	<b>18</b>
2.1 Co je PMD? . . . . .	18
2.2 Vznik dvojlomu ve vlákne a vliv na přenos . . . . .	19
2.3 Diferenciální skupinové zpoždění–DGD . . . . .	20
2.4 Limitní hodnoty optického vlákna . . . . .	22
2.5 Krátká vlákna–PMD . . . . .	24
2.6 Dlouhá vlákna–PMD . . . . .	25
2.7 Vnější vlivy způsobující změny PMD . . . . .	26
2.7.1 Závislost PMD na teplotě . . . . .	26
2.7.2 Vibrace . . . . .	27
2.7.3 Rychlost a nárazy větru . . . . .	27
<b>3 Metody měření PMD</b>	<b>28</b>
3.1 Tradiční interferometrická metoda měření PMD (TINTY) . . . . .	28
3.2 Obecná interferometrická metoda měření PMD (GINTY) . . . . .	30
3.2.1 Měřicí přístroj pro měření metodou GINTY . . . . .	31
3.3 Metoda skenování vlnové délky . . . . .	31
3.4 Měření s optickým polarizačním reflektometrem P-OTDR . . . . .	32
3.4.1 Měřič P-OTDR . . . . .	33
3.5 Polarimetrické metody . . . . .	33
3.5.1 Metoda analýzy Jonesovy matice . . . . .	34
<b>4 Metody kompenzace PMD</b>	<b>35</b>
4.1 Optická kompenzace PMD . . . . .	35
4.2 Optoelektronický PMD kompenzátor . . . . .	36
4.3 Elektronický PMD kompenzátor . . . . .	37
<b>5 Praktické měření PMD</b>	<b>38</b>
5.1 Poznatky měření PMD z nezávislého zdroje . . . . .	39
5.2 Měřicí soustava . . . . .	40



5.2.1	Forma výpisu dat do CSV souborů . . . . .	41
5.3	Základní parametry měřené trasy Technická 12–Campus Bohunice . .	43
5.4	Provedená měření PMD na reálné trase . . . . .	44
5.4.1	Výsledky měření . . . . .	44
5.4.2	Scénář 1 . . . . .	44
5.4.3	Scénář 2 . . . . .	46
5.5	Výroba termokomory pro teplotní stabilizaci . . . . .	48
5.6	Provedená měření PMD ve stabilizační termokoře . . . . .	52
5.6.1	Tabulky, grafy a jejich zhodnocení . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>59</b>
	<b>Literatura</b>	<b>61</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>65</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého DVD</b>	<b>66</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Optické vlákno se skokovým indexem lomu [1]	14
1.2	Gradientní optické vlákno [1]	15
1.3	Jednovidové optické vlákno [1]	15
1.4	Rozšíření impulzů vlivem materiálové disperze [1]	17
2.1	Znázornění vektoru elektrického pole [7]	18
2.2	Deformace vlákna [7]	19
2.3	Znázornění DGD [5]	20
2.4	Závislost DGD na vlnové délce [7]	21
2.5	Maxwellovo rozložení DGD [7]	21
2.6	Maximální přípustný posun délky bitů [7]	23
2.7	Max vzd. jako funkce koeficientu PMD a datové bitové rychlosti [9]	24
2.8	Model náhodné změny dvojlomu [7]	25
2.9	Závislost DGD na velikosti vlákna [5]	25
2.10	Časový vývoj teploty a PMD [14]	27
3.1	Tradiční interferometrická metoda [4]	28
3.2	Michelsonův interferometr [4]	29
3.3	Obecná interferometrická metoda-detail [2]	30
3.4	EXFO FTB-500 s modulem FTB-5500B, převzato z [12]	31
3.5	Metoda skenování vlnové délky [5]	32
3.6	EXFO FTB-500 s modulem SFTB-5600, převzato z [12]	33
3.7	Zapojení metody analýzy Jonesovy matice [7]	34
4.1	Optický kompenzátor[11]	35
4.2	Optoelektronický kompenzátor[11]	36
4.3	Elektronický kompenzátor[11]	37
5.1	Měřicí platforma EXFO FTB-200, převzato z [12]	40
5.2	Vzhled prostředí pro měření disperzí	41
5.3	Formát výpisu dat z měřicího přístroje do CSV souboru	41
5.4	Formát výpisu dat o teplotních údajích do CSV souboru	42
5.5	Měřená trasa Campus Brno	43
5.6	Graf závislost PMD a teploty na měřených dnech (29.7.–5.8. 2015)	45
5.7	Graf závislost PMD na měřených dnech (19.10.–22.10. 2015)	47
5.8	Propojení kontroléru s dalšími součástmi [15]	48
5.9	Krabička se zabudovaným kontrolérem, displejem a ovládacími prvky	49
5.10	Peltierův článek	50
5.11	Smotek vlákna v hliníkové termokomoře	50
5.12	Kompletní sestava termokomory i s optickým vláknem	51
5.13	Zapojení celé měřicí sestavy	52

5.14	Graf závislosti PMD na teplotě se zapnutým čerpadlem a ventilátorem	54
5.15	Graf závislosti PMD na teplotě se vypnutým čerpadlem a ventilátorem	56
5.16	Graf závislosti PMD na teplotě - zprůměrování tří hodnot pro obě situace . . . . .	58

## SEZNAM TABULEK

2.1	Limitní hodnoty PMD a PMD koeficientu [1] . . . . .	23
5.1	Tabulka tolerance PMD pro modul EXFO FTB-5700 převzato z [12] .	40
5.2	Parametry scénáře 1 . . . . .	44
5.3	Parametry scénáře 2 . . . . .	46
5.4	Tabulka s hodnotami při měření se zapnutým čerpadlem a ventilátorem	53
5.5	Tabulka s hodnotami při měření s vypnutým čerpadlem a ventilátorem	55
5.6	Tabulka zprůměrovaných hodnot 3 měření pro obě situace . . . . .	57

# ÚVOD

Polarizační vidová disperze – PMD v optickém vlákně se v oboru optoelektroniky za poslední roky dostala do popředí zájmů většiny lidí, kteří se v této oblasti pohybují. Při instalaci a nasazování vysokorychlostních optických sítí se měření hodnoty PMD stalo standardem.

PMD můžeme popsat jako druh zkreslení dílčích impulsů procházejících optickým vláknem. PMD vzniká na základě rozdílného indexu lomu v průřezu celého vlákna, které není ideální. Optický signál, který vychází z vysílače, je rozložen do dvou navzájem kolmých polarizačních rovin. V těchto rovinách se signál šíří pomocí dvou polarizačních vidů, z nichž jeden se šíří rychleji než druhý. To je způsobeno různými deformacemi vlákna.

Velikost PMD je náhodná veličina, která závisí na mnoha okolních faktorech. Mezi hlavní faktory ovlivňující velikost hodnoty PMD patří hlavně teplota a vibrace.

První kapitola se zabývá popisem optických vláken a jejím zavedením do oblasti telekomunikace. Zmíněny jsou zde materiály, ze kterých se optická vlákna vyrábí a také hlavní výhody optických vláken. Následuje popis parametrů jednotlivých typů optických vláken od mnohavidových až po jednovidová vlákna. Poslední část se zabývá hlavní příčinou zkreslení optického vlákna, a to disperzí.

Druhá kapitola obsahuje jak vlastně toto zkreslení vzniká. Věnuje se objasnění co vlastně PMD způsobuje a jeho závislosti na okolních vlivech. Další částí je popis diferenciálního skupinového zpoždění DGD. Obsaženy jsou zde také limitní parametry hodnoty PMD a koeficientu PMD. V závěru kapitoly se vyskytují závislosti koeficientu PMD na délce optického vlákna.

Obsah třetí kapitoly je zaměřen na způsoby měření PMD. Obsahuje výpis jednotlivých měřících metod PMD, jejich bloková schémata, výhody, nevýhody a použití. Zmíněny jsou zde i měřící přístroje pro některé metody měření.

Ve čtvrté kapitole můžeme najít kompenzační metody vhodné pro snížení účinku vlivu PMD bez zasažení do optické trasy. Popsány jsou zde tři základní kompenzační metody.

Kapitola pátá obsahuje praktickou část měření. Dále poznatky měření PMD z nezávislého zdroje. Vyskytuje se zde popis a základní parametry měřené trasy Technická 12–Campus Bohunice. Poté je zde obsaženo měření v teplotní komoře se stabilizací teploty a popis její výroby. Dále je zde zmíněna použitá měřící soustava ze základními informacemi a stylem výpisu důležitých dat z přístroje. Provedená měření PMD na jednovidovém optickém vlákně spolu s informacemi o jednotlivých scénářích měření a výsledných grafech jsou obsaženy na závěr této kapitoly.

# 1 OPTICKÁ VLÁKNA

V průběhu posledních dvaceti let dochází k velkému rozvoji v oblasti telekomunikačních přenosových médiích v podobě nasazování optických vláken, které nahrazují metalické kabely. Tyto vlákna se používají pro jejich mnohem lepší přenosové vlastnosti. Přenos po optickém vlákně je tedy mnohem výhodnější a bezpečnější než po metalických vedeních. Ale i při tomto přenosu dochází k nežádoucím vlivům mezi které patří změna tvaru a zeslabování přenášených impulzů. Poté musí být použity pro zvýšení dosahu opakovací, které mohou být dvojího typu, buď regenerační nebo zesilovací [1].

Optická vlákna jsou vyrobena převážně z oxidu křemičitého –  $\text{SiO}_2$ . Pro různé vlastnosti vláken je použito mnoho dopantů neboli legovacích příměsí, a to například  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_5$  a další. Slučováním těchto dopantů dosahují optická vlákna potřebných vlastností jako je velikost a průběh indexu lomu jádra a pláště. Složení optických vláken tedy výrazně ovlivňuje jeho přenosové vlastnosti. V současné době tvoří optická vlákna většinu páteřních rozvodů velkých měst. Jejich hlavní přednosti jsou [1]:

- velká šířka přenášeného pásma,
- nízký útlum,
- přenos na velké vzdálenosti,
- odolnost proti elektromagnetické interferenci,
- nízká hmotnost,
- malé rozměry,
- dostupnost materiálů pro výrobu,
- bezpečnost proti odposlechu.

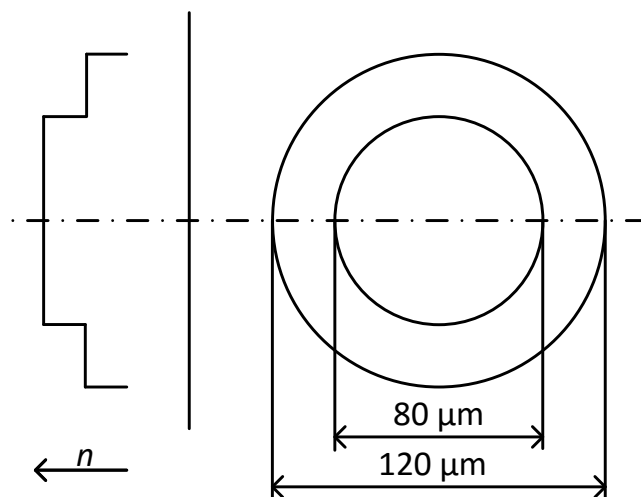
## 1.1 Druhy optických vláken

Optická vlákna se třídí podle jejich typu konstrukce. Základním vlastností pro rozdělení optických vláken je podle průměru jejich jádra a velikosti indexu lomu pláště. Pokud se jádrem šíří více světelných signálů jedná se o mnohovidové optické vlákno. Průměr jádra i pláště mnohovidového optického vlákna je mnohem větší než u jednovidových vláken, proto se využívá pro přenosy na krátké vzdálenosti. Oproti tomu jednovidová vlákna s podstatně menším průměrem jádra i pláště mají využití v přenosech na velké vzdálenosti.

### 1.1.1 Mnohovidová optická vlákna

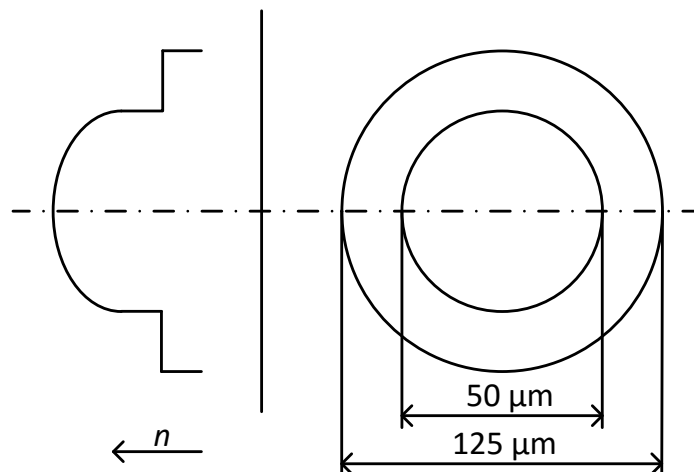
Můžeme je ještě dále dělit na:

1. Mnohovidová optická vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště, jejichž výroba, manipulace i konstrukce s nimi je vcelku jednoduchá. Průměr jádra těchto vláken se pohybuje kolem hodnot  $D_j=50\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$  a průměr pláště  $D_p=120\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ . Dalšími parametry vláken tohoto typu je větší útlum, který je okolo  $5\text{--}20\text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  a také větší disperze okolo  $50\text{ ns}\cdot\text{km}^{-1}$ . Přenosová kapacita neboli šířka pásma je  $60\text{ MHz}$ . Mnohovidová vlákna mají nejčastější využití především pro automatizační účely, krátké přenosy dat a lokální sítě [1].



Obr. 1.1: Optické vlákno se skokovým indexem lomu [1]

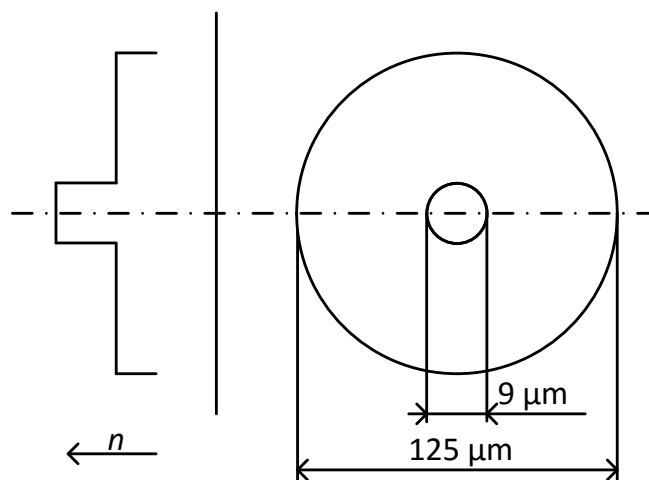
2. Mnohovidová vlákna s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna jsou částečně složitější na výrobu, z toho plyne i složitější manipulace, konstrukce a spojování vláken. Toto vlákno se může také nazývat takzvaně gradientní. Velikost průměru jádra a pláště je u těchto vláken normalizován dle normy ITU-T. Průměr jádra je  $D_j = 50\text{ }\mu\text{m}$  a pláště  $D_p = 125\text{ }\mu\text{m}$ . Tyto vlákna vykazují menší útlum  $2,5\text{--}5\text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  a také menší disperzi kolem  $1\text{ ns}\cdot\text{km}^{-1}$ . Velikost šířky přenášeného pásma dosahuje  $600\text{ MHz}$ . Využití těchto vláken je hlavně v telekomunikačních účelech pro krátké vzdálenosti [1].



Obr. 1.2: Gradientní optické vlákno [1]

### 1.1.2 Jednovidová optická vlákna

Jednovidová optická vlákna s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště (viz obr. 1.3) jsou v nynější době v oboru telekomunikace jedny z nejvyužívanějších. Základní charakteristikou jednovidových vláken je velmi malý průměr jádra jen okolo  $D_j = 7\text{--}9\text{ }\mu\text{m}$ . Takto malý průměr jádra zajišťuje, že se vláknem šíří pouze jeden vid ve směru osy vlákna. Průměr pláště je  $D_p = 125\text{ }\mu\text{m}$ . Disperze jednovidového vlákna se pohybuje okolo cca  $0,3\text{ ns}\cdot\text{km}^{-1}$ . Mezi další důležité vlastnosti tohoto vlákna patří velmi malý útlum, který je v řádech desetin. Hodnota útlumu reálného vlákna je kolem  $0,2\text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$  při použití vlnové délky  $\lambda = 1,55\text{ }\mu\text{m}$ . Šířka přenášeného pásma je několikanásobně větší než u mnohovidových vláken. Jednovidová vlákna se vyznačují šířkou pásma až 10 GHz [1].



Obr. 1.3: Jednovidové optické vlákno [1]



## 1.2 Disperze u optických vláken

Hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu v optických vláknech jsou disperzní vlivy, jež negativně ovlivňují přenosové vlastnosti vlákna a závisí na fázové rychlosti, která je dána vztahem

$$v_f = \frac{\omega}{k} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (1.1)$$

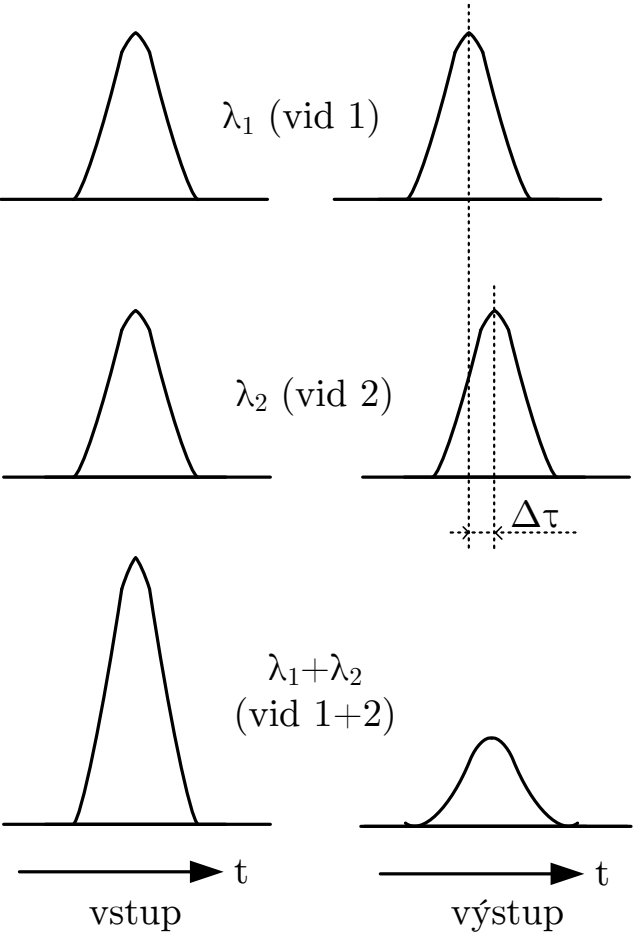
a také na skupinové rychlosti

$$v_s = \frac{d\omega}{dk} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]. \quad (1.2)$$

Disperzi tedy zařazujeme mezi jedny z nejdůležitějších parametrů optického vlákna, neboť určuje šířku přenášeného pásma a tím i přenosovou rychlost. Disperzi vln můžeme definovat jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky výstupního optického signálu oproti vstupnímu signálu. Informace o hodnotě disperze by měla být u jednotlivých vláken udána [1].

Kmitočtová závislost indexu lomu, která vyvolá kmitočtovou závislost skupinové (vzorec 1.2) a fázové rychlosti (vzorec 1.1) šíření vlny v materiálu, ze kterého je světlovod vyroben, je důsledkem materiálové disperze (obr. 1.4). U materiálové disperze se paprsky o různých vlnových délkách šíří různými rychlostmi, to je způsobeno nelinearitou kmitočtového průběhu indexu lomu. Materiálová disperze se ve světlovodu kombinuje s disperzí vlnovodovou. Shrnutí těchto dvou disperzí, tedy materiálové a světlovodové se nazývá disperzí chromatickou [1].

Pokud je přenášena energie rozdělena do více vidů, nastupuje k chromatické disperzi ještě disperze vidová. Vidová disperze vzniká rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů. Pomocí zúžení kmitočtového spektra můžeme zkreslení způsobené chromatickou disperzí snížit. Dále pokud vhodným konstrukčním řešením zmenšíme počet přenášených vidů přenosu dosáhneme zredukování vlivu vidové disperze. Hraniční případ je, že zredukujeme počet vidů pouze na jeden vid – jednovidový světlovod. Jednovidový světlovod má pouze chromatickou disperzi [1].



Obr. 1.4: Rozšíření impulzů vlivem materiálové disperze [1].

## 2 POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE–PMD

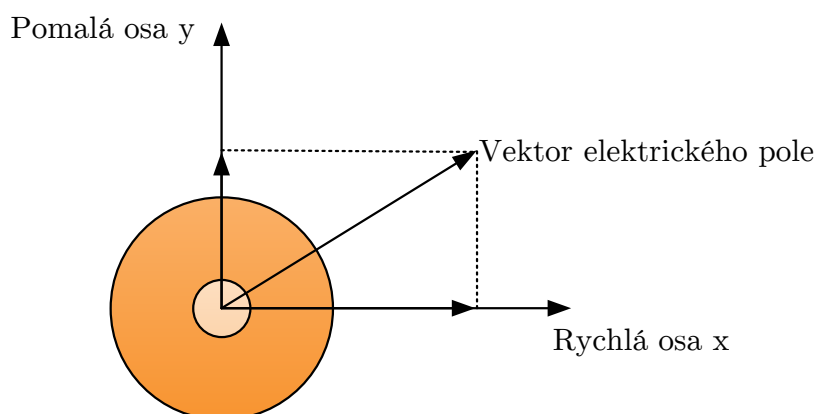
Mezi důležitý jev v optoelektronice patří polarizační vidová disperze, která je způsobena anizotropními vlastnostmi optického vlákna. Index lomu není v celém průřezu stejný, ale díky některým jevům je funkcí okolních parametrů a to například tlaku, tahu, teploty atd. Jednotlivé složky světla se šíří různou rychlostí a tak vzniká polarizační vidová disperze, která se zkráceně označuje jako PMD.

Velikost PMD je náhodná veličina, která je proměnná v čase. Při provozu vysokých přenosových rychlostí na optických trasách představuje jeden z hlavních problémů optického vlákna. Vlivem PMD se omezuje maximální přenášená rychlost systému a také dochází ke snížení odstupu signál-šum (SNR) tím, že časovým rozšířením impulsu se snižuje výkonová špička impulsu [5, 3].

### 2.1 Co je PMD?

Vznik PMD je dán nehomogenními vlastnostmi vlákna a z tohoto důvodu se ve vlákne vyskytuje takzvaný dvojlom. Pokud tedy optický signál vystoupí ze zdroje vysílače do optického vlákna dojde k rozložení tohoto signálu do dvou navzájem kolmých polarizačních rovin, kde se signál šíří prostřednictvím dvou polarizačních vidů.

V jedné z těchto rovin běží polarizační vid pomaleji a říkáme ji „pomalá“ osa  $y$ , ve druhé rovině je procházející polarizační vid rychlejší a říkáme ji „rychlá“ osa  $x$ . Tento způsob šíření se označuje jako PSP (*Principal States of Polarization*). Sloučením těchto dvou vidů dochází ke vzniku požadovaného vektoru elektrického pole obr. 2.1, [1, 5, 7].



Obr. 2.1: Znázornění vektoru elektrického pole [7]

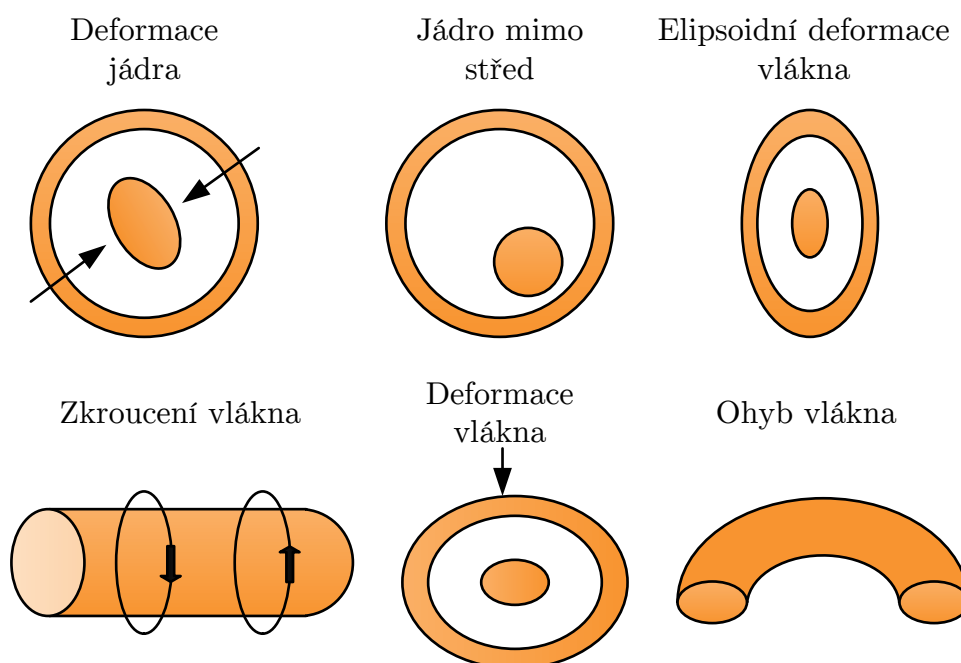
## 2.2 Vznik dvojlomu ve vlákne a vliv na přenos

S nárůstem přenosových rychlostí v jednovíkových optických vláknech nad hodnotu  $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  vzrostla potřeba měření PMD. Vid, procházející optickým vláknem se nám šíří ve dvou na sebe kolmých polarizačních rovinách. Tento jev se nazývá dvojlom a zhoršuje se při jakékoliv kruhové nesymetrii optického vlákna.

V současné době nelze ve výrobě vytvořit ideální vlákno, a tak se u vláken vyskytují různé nehomogenní vlastnosti. Mezi tyto nehomogenní vlastnosti například patří (viz obr. 2.2,[1, 5, 7]):

- deformace jádra,
- jádro mimo střed,
- elipsoidní deformace jádra,
- zkroucení vlákna,
- deformace vlákna,
- ohyb vlákna.

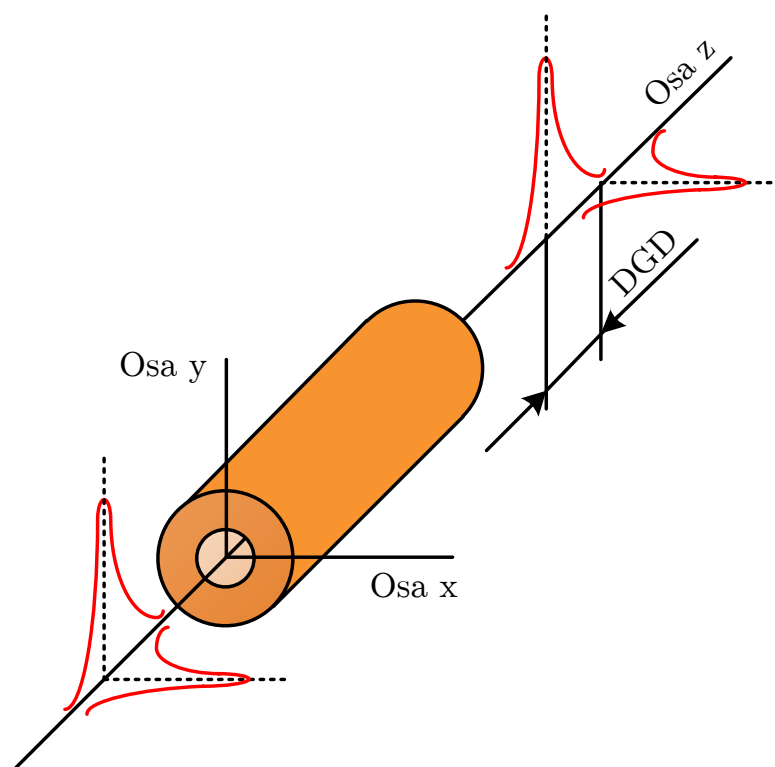
Mnohé deformace vlákna nejsou pouze z výroby, ale také vznikají špatným uložením při vlastní montáži vlákna. Poté může na kabel působit jakýkoli vnější tlak, který zapříčiní zhoršení přenosu. To vše může mít za následek šíření obou polarizací jinou rychlostí a tím pádem zkreslení nebo rozšíření impulsu [1, 5, 7].



Obr. 2.2: Deformace vlákna [7]

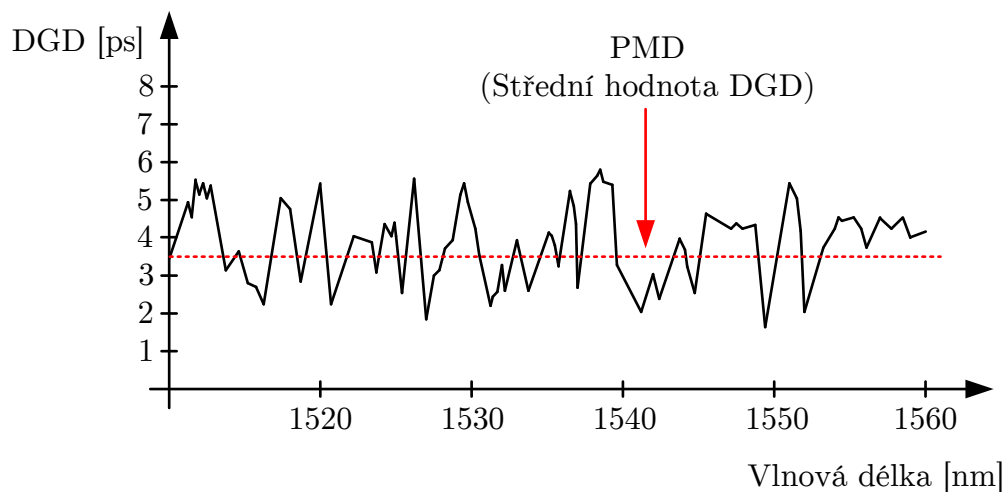
## 2.3 Diferenciální skupinové zpoždění–DGD

Vzhledem k tomu, že informace nesená v optickém vlákně se skládá z dvou polarizačních vidů dochází na konci měřené trasy ke zpoždění  $\Delta\tau$ . Toto zpoždění se u optického vlákna označuje jako diferenciální skupinové zpoždění neboli spíše anglickou zkratkou DGD (*Differential Group Delay*) a je zobrazeno na obrázku 2.3. Tímto zpožděním, které je vyjádřeno v pikosekundách ( $10^{-12}$ ), dojde ke zkreslení a protažení výstupního signálu na přijímači [5, 6].



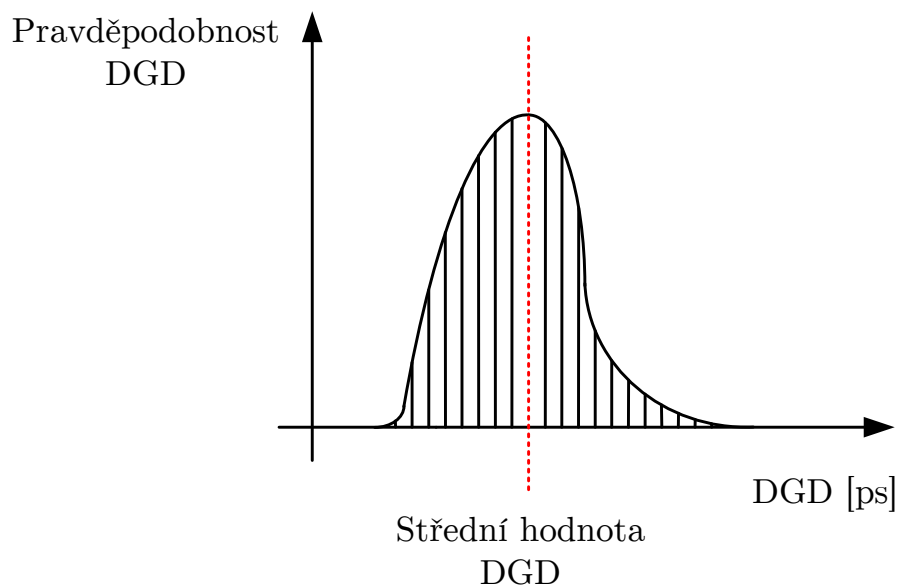
Obr. 2.3: Znázornění DGD [5]

Velikost diferenciálního skupinového zpoždění DGD má nedeterministický charakter a mění se prudce s vlnovými délkami a časem. Mezi nejvýznamnější ovlivňující faktor DGD patří vibrace v okolí vlákna a teplota. Hodnotu PMD dostaneme efektivní z hodnoty diferenciálního skupinového zpoždění DGD. Můžeme to vidět na následujícím obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Závislost DGD na vlnové délce [7]

Hodnoty PMD se náhodně pohybují okolo průměrné hodnoty DGD a častěji bývají popsány pomocí Maxwellova rozložení.



Obr. 2.5: Maxwellovo rozložení DGD [7]

V obrázku Maxwellova rozložení (2.5) se DGD mění pomalu v průběhu času, ale rychle v závislosti na vlnové délce. Zkušenosti s měřením ukázaly dobrou shodu s Maxwellovým rozložením. Frekvence průměru střední hodnoty DGD se pohybovala okolo 10 % a méně v období, které vykazovalo výrazné teplotní výkyvy [7].

Jedním z běžných parametrů používaných k charakterizaci zpoždění PMD je střední hodnota DGD po určitém rozsahu vlnových délek ( $\Delta\tau$ ) a jednotkou je [ps] [7].

$$\text{Střední hodnota DGD} = \Delta\tau l \quad (2.1)$$

Střední hodnota je přímo úměrná druhé odmocnině délky vlákna. Pokud se zdvojnásobí střední hodnota DGD, musí být délka vlákna zvýšena čtyřikrát.

Koeficient PMD  $\Delta\tau_c$ , který je v jednotkách ps/ $\sqrt{\text{km}}$ , se využívá pro vyjádření zpoždění PMD jako funkce délky vlákna [7].

$$\Delta\tau = \Delta\tau_c \sqrt{l}, \quad (2.2)$$

kde  $l$  je délka vlákna.

PMD je tedy následně definováno těmito čtyřmi základními parametry [7]:

1. PMD zpoždění v [ps] nebo střední hodnota DGD.
2. PMD koeficient v ps/ $\sqrt{\text{km}}$ .
3. Zpoždění PMD druhého řádu nebo DGD2.
4. Koeficient PMD druhého řádu nebo také PMD2 v [ps $\frac{\text{nm}}{\text{km}}$ ].

## 2.4 Limitní hodnoty optického vlákna

Střední hodnota DGD způsobuje, že přenos pulsní frekvence se rozšiřuje při cestě vláknem, vytváří zkreslení a zvyšuje přenosovou bitovou chybovost = Bit-Error-Rate (BER) optického systému. Důsledkem je omezení přenosové vzdálenosti pro danou přenosovou rychlost.

PMD je menší, pokud je lépe řízená výroba vlákna (geometrie vláken) a je provedena kompenzace PMD moduly.

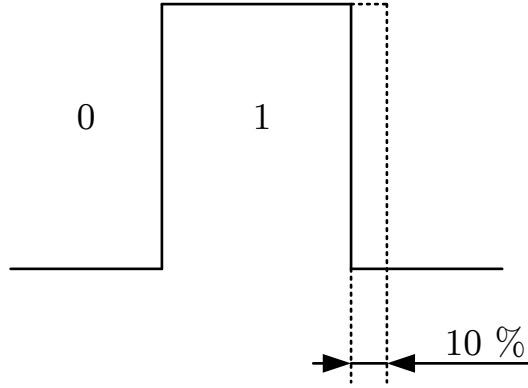
Otázka PMD se týká více starých vláken G.652, které byly vyrobeny před rokem 1996, než u novějších vláken G.653, G.655.

Pokud je známo maximální PMD zpoždění, můžeme maximální přípustnou délku vlákna odvodit pomocí vzorce (2.3) [7].

$$l = \frac{\Delta\tau^2}{\Delta\tau_{\text{cmax}}^2} \quad (2.3)$$

Statistický charakter PMD bere v úvahu, pokud se definuje maximální přípustné PMD zpoždění jako 10 % z bitové délky  $T_B$  (obr. 2.6) pro systém, aniž by byl narušen výkon sítě o více než 1 dB ztráty u vlákna s vlnovou délkou  $\lambda=1550$  nm a s NRZ kódováním [7].

$$\Delta\tau_{\max} \leq \frac{T_B}{10} \quad (2.4)$$



Obr. 2.6: Maximální přípustný posun délky bitů [7]

Vzhledem k tomu, že u přenosové rychlosti 10 Gb/s je délka bitu 100 ps, může být určena teoretická hodnota maximálního PMD zpoždění (rovnice 2.5). V praxi můžou některé systémy přijmout až 13–14 ps v závislosti na struktuře kódování.

$$\Delta\tau = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ ps} \quad (2.5)$$

Limitní hodnoty PMD dle standardu ITU-T G.697 jsou v zobrazeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Limitní hodnoty PMD a PMD koeficientu [1]

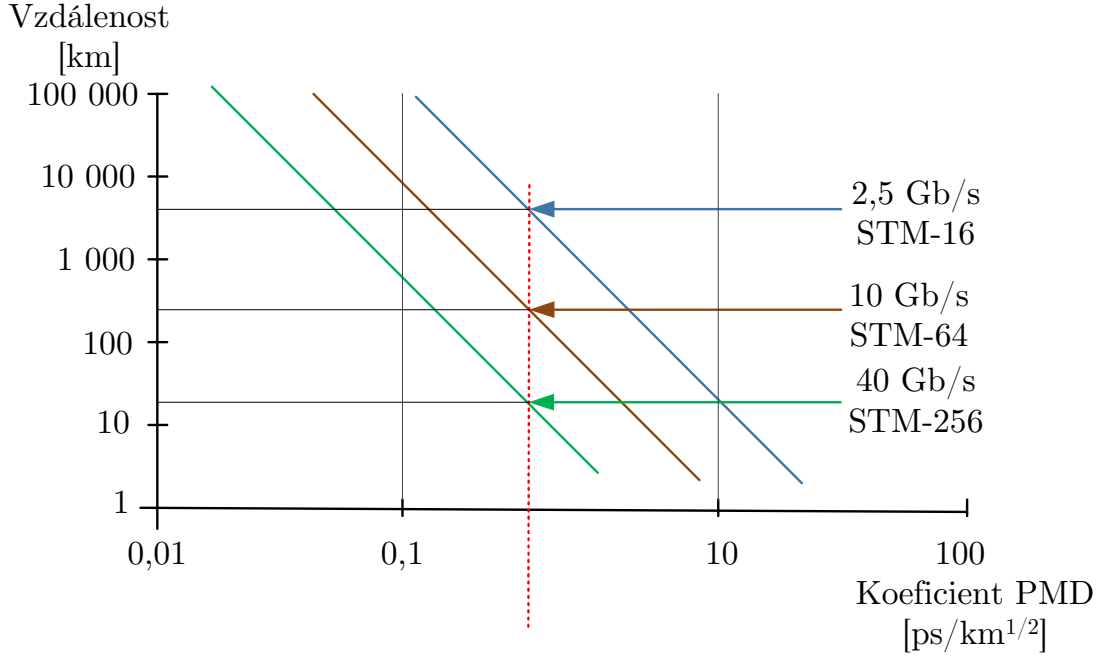
Přenosová rychlost [Gbit/s]	0,155	0,622	2,5	10	40
SDH	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64	STM-256
Doba trvání bitu [ps]	6430	1610	401,88	100,47	25,12
PMD limit [ps]	640	160	40	10	2,5
PMD koef. 400km [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	>32	>8	>2	>0,5	>0,125

Tyto PMD limity se používají pro stanovení maximální přípustné délky vlákna. V návaznosti pro typické přenosové soustavy je maximální hodnota PMD koeficientu funkcí délky při dané přenosové rychlosti.

V následujícím obrázku 2.7 je předpokládáno: PMD se považuje za Maxwellovo rozdělení, kódování je použito NRZ (Non return to zero neboli česky bez návratu k nule), použitý laser o vlnové délce  $\lambda=1550 \text{ nm}$ , maximální ztrátový výkon je 1 dB, BER je typicky  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$  bitů.

$$l = \frac{10^4}{(B \cdot PMD)^2} \quad (2.6)$$





Pro PMD=0,5 ps/km je max. vzd.:

6400 km – 2,5 Gb/s

400 km – 10 Gb/s

25 km – 40 Gb/s

Obr. 2.7: Max vzd. jako funkce koeficientu PMD a datové bitové rychlosti [9]

## 2.5 Krátká vlákna–PMD

V případě, že je délka vlákna ( $l$ ) mnohem menší než délka korelační ( $l_c$ ) je vlákno nazýváno jako krátké vlákno. U krátkého vlákna považujeme dvojlom za jednotný a vidová vazba je zde nepřítomna. Dvojlom zde může být vyjádřen jako rozdíl šíření mezi rychlou a pomalou osou [9].

$$\Delta\beta = \frac{\omega n_s}{c} = \frac{\omega n_f}{c} = \frac{\omega \Delta n}{c} \quad (2.7)$$

kde:  $\omega$  – úhlová optická frekvence,  $c$  – rychlost světla,  $\Delta n = n_s - n_f$  je efektivní rozdíl indexu lomu pomalé a rychlé osy.

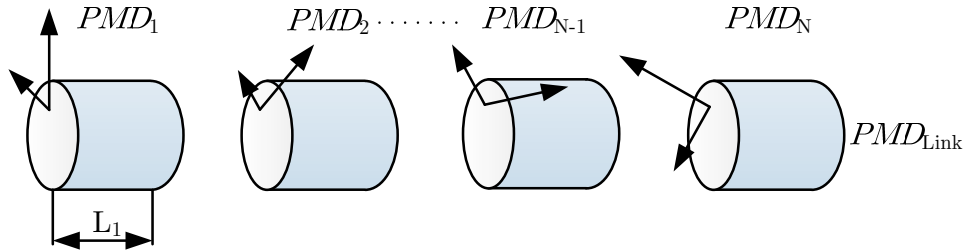
Při měření PMD na krátkých vláknech si můžeme ověřit, že změřený koeficient PMD (jednotky ps/km) je při vzdálenosti do asi 10 km takřka lineární viz obr. 2.9. Pak je tedy koeficient PMD vyjádřen tímto vztahem:

$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{l}, \quad (2.8)$$

kde:  $\Delta\tau$  – zpoždění signálu,  $l$  – délka trasy.

## 2.6 Dlouhá vlákna–PMD

Vlákna o délce ( $l$ ) mnohem větší než je korelační délka ( $l_c$ ) se nazývají dlouhá vlákna. V dlouhých vláknech již dvojlom nelze považovat za jednotný, protože vzhledem k délce vlákna se zde mohou vyskytovat různé deformace a také je zde přítomná vidová vazba. DGD pro dlouhé trasy odkazuje také na Maxwellovo rozložení, které charakterizuje  $PMD_{\text{Link}}$  (vzorec 2.9) a týká se jednotlivých prvků PMD. Dlouhá vlákna mohou být modelována jako zřetězení dvojlomných úseků, jejichž dvojlom osy a veličiny se mění náhodně viz obr. 2.8, [7].

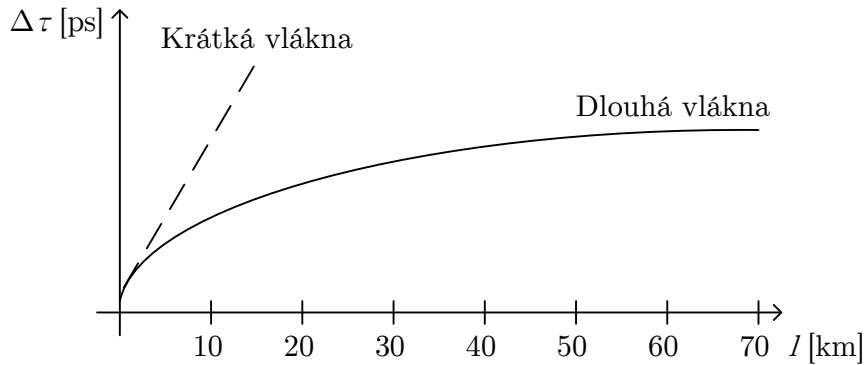


Obr. 2.8: Model náhodné změny dvojlomu [7]

$$PMD_{\text{Link}} = \frac{1}{l_{\text{Link}}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.9)$$

Většina přenosových systémů značně přesahuje délku vlákna 10 km. U takových vláken již není závislost zpoždění na délce lineární. Koeficient PMD se u těchto vláknech mění s odmocninou délky a je tedy nelineární viz obrázek 2.9. Jednotkou je ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Vztah pro dlouhá vlákna tedy potom vypadá takto:

$$PMD = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}. \quad (2.10)$$



Obr. 2.9: Závislost DGD na velikosti vlákna [5]

## 2.7 Vnější vlivy způsobující změny PMD

Velikost polarizační vidové disperze je ovlivněna mnoha okolními vlivy. Mezi nejdůležitější vlivy patří teplota, vibrace, vítr, špatné uložení nebo také deformace z výroby. To všechno způsobuje vznik dvojlomu v optickém vlákně a také potvrzení teorie o PMD, že je nepředvídatelná a statistické povahy.

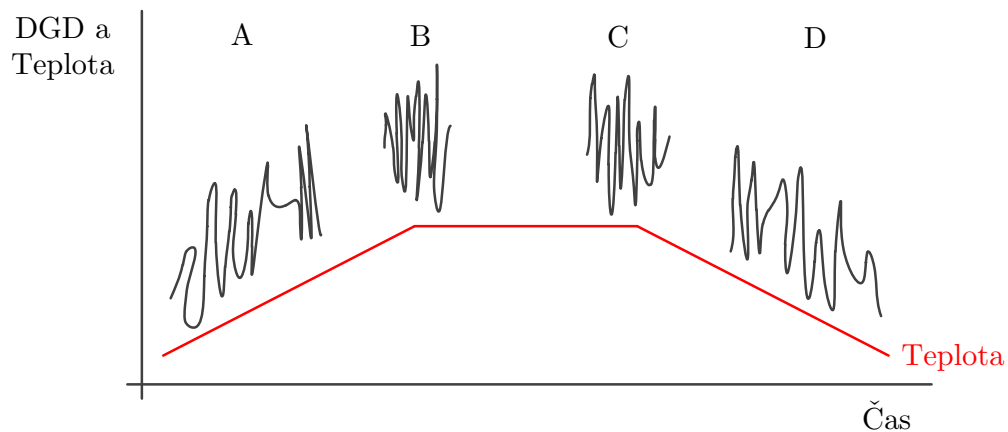
### 2.7.1 Závislost PMD na teplotě

Vzhledem k tomu, že optická trasa bývá vedena přes budovy, sklepy, místnostmi se servery a také venkovním prostředím, tak se často mění klimatické podmínky v okolí vlákna. Změnami prostředí se razantně mění teplota a vznikají velké teplotní rozdíly mezi danými prostředími. U optických vláken poté dochází ke změnám tepelné roztažnosti. Musíme však podotknout, že u velkých kabelů obsahujících více optických vláken dochází ke změně teploty se zpožděním.

Teplota ovlivňuje hodnotu PMD ve vlákně spíše nepřímo. Jinými slovy teplota může působit na materiál, kterým je vlákno obklopeno (plášť, kovové prvky apod.). Tento materiál se může změnami teplot smršťovat a roztahovat, to může deformovat vlákno a v důsledku toho se může měnit PMD. Takto deformované vlákno, které není na průřezu dokonale symetrické způsobuje v průběhu přenosu signálu zrychlení nebo zpomalení „rychlé“ a „pomalé“ složky vidu.

Velikost PMD je tedy závislá na okolní teplotě vlákna, stejně jako míra teplotní změny. Teplotní změna v průběhu času udává časový vývoj DGD, který můžeme vidět na obrázku 2.10. Obecně hodnota DGD vykazuje rychlé oscilační chování v čase. Když se teplota postupně zvyšuje nebo snižuje, tak DGD kmitání zůstává přibližně konstantní, ale zvyšuje se nebo snižuje jeho amplituda (sektor A a D). Nicméně, pokud dojde k náhlé změně teploty, frekvence kmitů se rychle zvyšuje (sektor B a C) [14].

Existují tři hlavní účinky, které způsobují změnu polarizace jako funkci teploty. Změna okolní teploty vlákna a tím změna délky vlákna v důsledku tepelné roztažnosti. Toto zvýšení délky umožní stavy polarizace (SOP) oddělit po delší dobu a dochází k dalšímu šíření impulsu. Tento účinek je však malý, ale bude přispívat ke změnám v disperzi. Dalším účinkem je jiná tepelná roztažnost různých povlaků a vyrovnávacích vrstev. To bude mít za následek vnitřní napětí ve vlákně, což má za následek DGD. A na závěr dvojlom závisící lineárně na teplotě, který má za následek vnitřní napětí uvnitř vlákna a DGD [14].



Obr. 2.10: Časový vývoj teploty a PMD [14]

### 2.7.2 Vibrace

Vibrace v optickém vlákne se objevují, když je teplota dostatečně nízká a dojde ke konkrétním větrným podmínkám. Jedná se o optické kabely vedené ve vzduchu pomocí sloupů. Pokud je vlákno uloženo v zemi poblíž silnice nebo například stavby, tak se vibrace z projíždějících aut, stavebních vozidel a různých prací projeví na hodnotě koeficientu PMD. Z mechanického hlediska vibrace mění statické koeficienty síly a vyvolávají deformaci. Nekontrolovatelné vibrace se vyznačují nízkými frekvencemi ale s velkou amplitudou. Tyto vibrace mají značný dopad na SOP a také na případné změny hodnoty PMD v optických vláknech. Vibrační vliv můžeme trochu omezit použitím například Stockbridgovým tlumícím zařízením [13].

### 2.7.3 Rychlost a nárazy větru

Za určitých podmínek, v případě, že vítr dosahuje vysokých rychlostí mohou některé účinky rušit přenos vláken. Oscilační síly vytvořené větrem mohou způsobit rezonanci a deformaci kabelu (například ohyby). Za těchto podmínek je vlákno ve stresu a může dojít ke zkroucení a tím pádem ke změně dvojlomu. Ten způsobí změnu DGD jako funkci vlnové délky a také i hodnotu PMD vlákna [13].

V případě nárazů větru se jedná o vítr o 50 % silnější než je průměrná hodnota větru a označuje se jako „nárazový“. Tyto poryvy větru mohou opět způsobit oscilaci a velké změny amplitudy kabelu. Těmito podmínkami dochází ke vznikům ohybů a mírným změnám tvaru kabelu, které se projevují v polarizaci a tudíž v PMD vlákna [13].

### 3 METODY MĚŘENÍ PMD

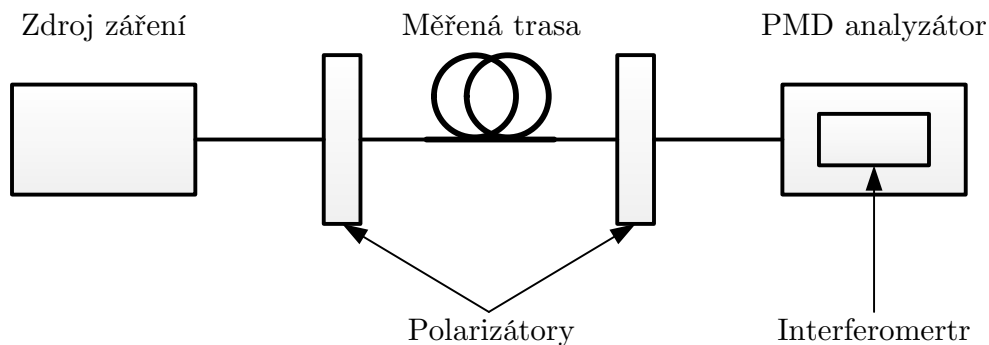
V posledních letech se musíme stále více zabývat u vysokorychlostních přenosových optických sítích měřením jednoho z hlavních problémů těchto sítí, a to polarizační vidové disperze. PMD vzniká přítomností dvojlomu ve vlákne, ten ve vlákne vzniká rozdělením signálu do dvou polarizačních rovin, které mají vůči sobě odlišnou rychlosti šíření. Jelikož se přenosové rychlosti optických sítí stále zvětšují, tak se hodnota PMD dostala do zájmu většiny lidí pohybujících se v této oblasti. Z vlastností PMD vyplývá nutnost měřit tento jev ve všech etapách života vlákna. Oblasti, kde se všude využívá měření PMD:

- výrobci optických vláken a kabelů,
- firmy, jež se zabývají instalací optických sítí,
- provozovatelé optických sítí,
- měřící technici.

V současné době se tedy měření PMD stává všeobecným standardem před nasazením vysokorychlostních optických tras s jednovidovými vlákny. Pro měření PMD existuje řada dostupných metod [2].

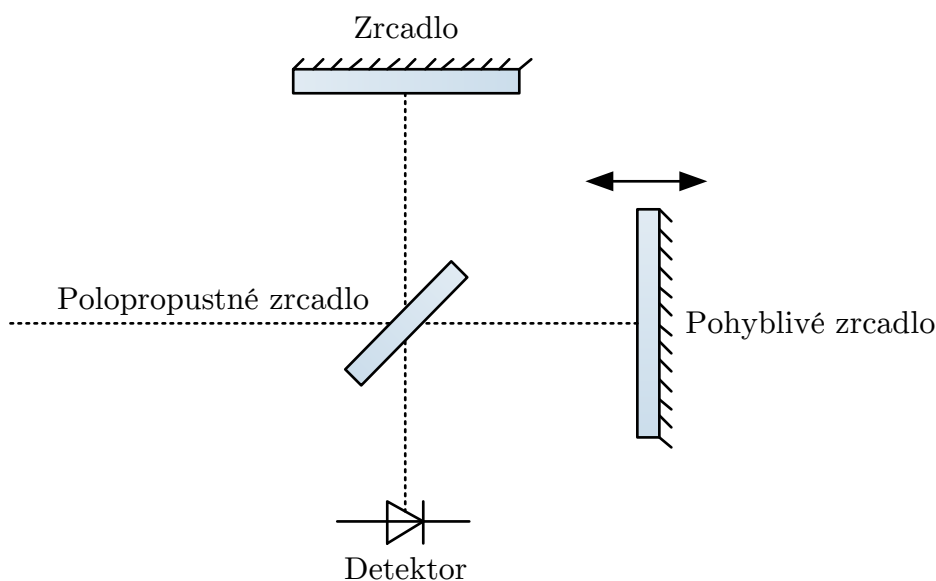
#### 3.1 Tradiční interferometrická metoda měření PMD (TINTY)

Interferometrická metoda pro měření optických tras patří mezi nejvhodnější a nej-používanější metody měření PMD (používá se pro ni zkratka TINTY). Hlavními výhodami jejího použití jsou: rychlost, relativně jednoduché měření a také její možné použití přímo „v terénu“. Na následujícím obrázku 3.1 je schématické uspořádání této metody [4, 2, 1].



Obr. 3.1: Tradiční interferometrická metoda [4].

Metoda je založena na interferenci nízko-koherentního optického záření. Jako zdroj záření využívá širokospektrální zdroj záření (neboli nízko-koherentní zdroj), kterým většinou bývá LED dioda. Výstup této LED diody je polarizován. Poté je toto záření navázáno do vlákna optické trasy. Na konci této trasy se nachází PMD analyzátor. Základem PMD analyzátoru je Michelsonův interferometr, na kterém se získává autokorelační funkce přicházejícího optického záření. Detailně je tento interferometr zobrazen na obrázku 3.2 [2, 4, 6].

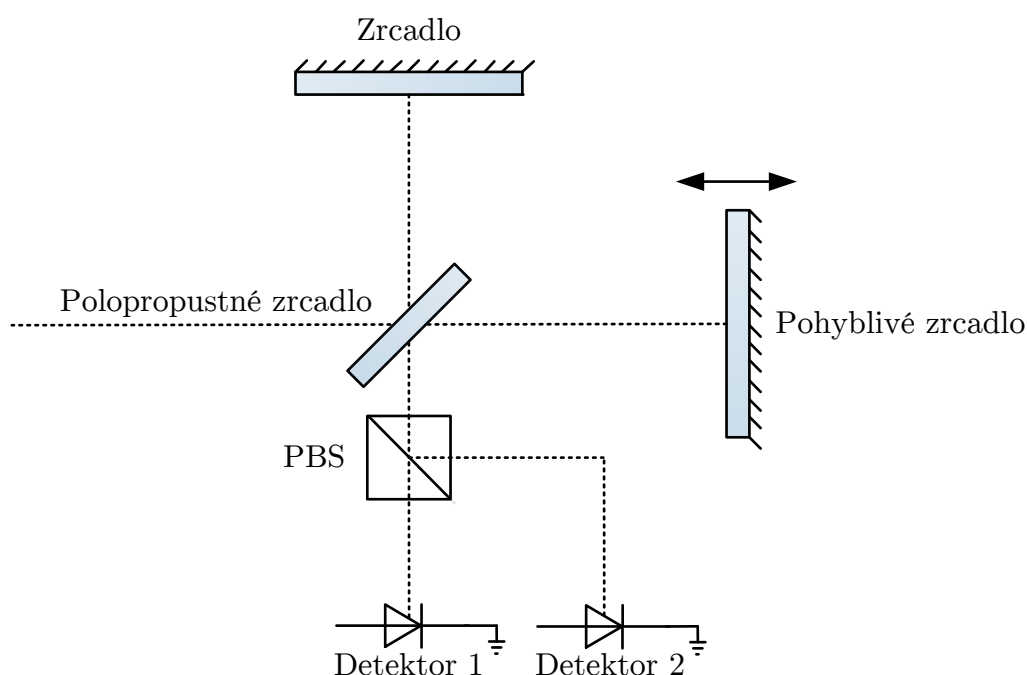


Obr. 3.2: Michelsonův interferometr [4]

V interferometru se polarizované optické záření rozdělí do dvou ramen, z nichž jedno rameno je zakončeno pevným zrcadlem a druhé rameno pohyblivým zrcadlem. Záření se od obou zrcadel odráží zpět a na detektoru pak nastává interference signálů z obou ramen. Pokud pohyblivé zrcadlo posuneme, tak se změní vzájemný časový posun mezi signály obou ramen. Tímto způsobem se získává tzv. interferogram, ze kterého je poté stanovováno zpoždění vlivem PMD. Vlivem autokorelační špičky, která je přítomná ve výsledném interferogramu je metoda nevhodná pro měření velmi malých hodnot. Vlivem autokorelace také nelze také vyhodnocovat PMD přímo z interferogramu, ale musíme jej prokládat Gaussovou křivkou [1, 2, 4, 6].

## 3.2 Obecná interferometrická metoda měření PMD (GINTY)

V obecné metodě je základním rozdílem oproti metodě TINTY to, že výsledný signál, který obsahuje optické záření z obou ramen interferometru je rozdělen pomocí polarizačního děliče paprsku (PBS) na dvě vzájemně kolmo polarizované složky, které dopadají každá na zvláštní detektor viz obrázek 3.3. Na obou detektorech dochází k interferenci a oba tyto obrazce obsahují obě korelační složky. Pomocí matematických operací můžeme tyto složky od sebe oddělit. „Odečtením“ interferogramů se získá samotná vzájemná korelace a „sečtením“ obdržíme čistou autokorelaci [1, 2, 4].



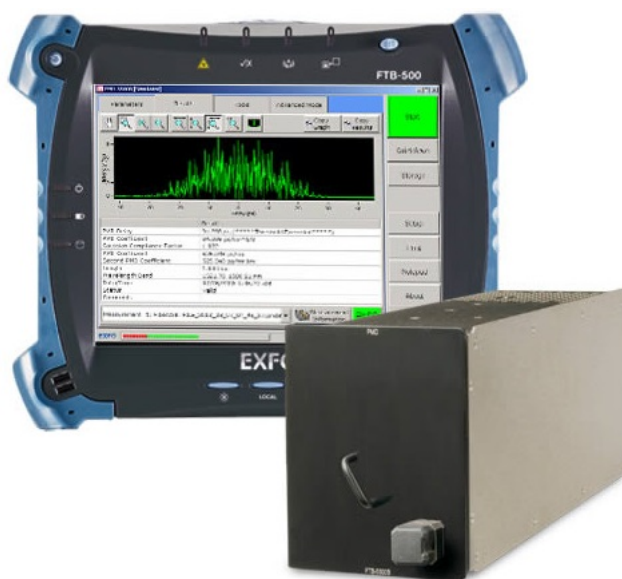
Obr. 3.3: Obecná interferometrická metoda-detail [2]

Metoda GINTY nám tedy umožňuje autokorelační špičku z výsledného interferogramu odstranit. Poté můžeme provádět vyhodnocování PMD pomocí samotné vzájemné korelace. Měření metodou GINTY se provádí v jednom kroku, není zde žádná nutnost nastavování referenční hodnoty. Metoda je výhodná svou rychlostí, odolností proti vibracím vlákna a je vhodná pro měření „v terénu“ [1, 2, 4].

### 3.2.1 Měřicí přístroj pro měření metodou GINTY

Pro měření metodou GINTY můžeme využít měřicí přístroj EXFO FTB-500 s osazeným modulem FTB-5500B pro měření PMD (viz obr. 3.4). Tato měřicí platforma poskytuje rychlé a přesné měření PMD na optických trasách od středních vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po velmi dlouhé optické transportní trasy, které mohou být podzemní, tak i závěsné. Vložený modul je vhodný pro testování optických tras s přenosovými kapacitami: 10, 40 a 100 Gbit · s<sup>-1</sup>.

Vzhledem k pokročilé softwarové analýze je navíc možné zjišťovat PMD 2.řádu a díky tomu můžeme přesněji určit kvalitu přenosu u vysokorychlostních systému [12].



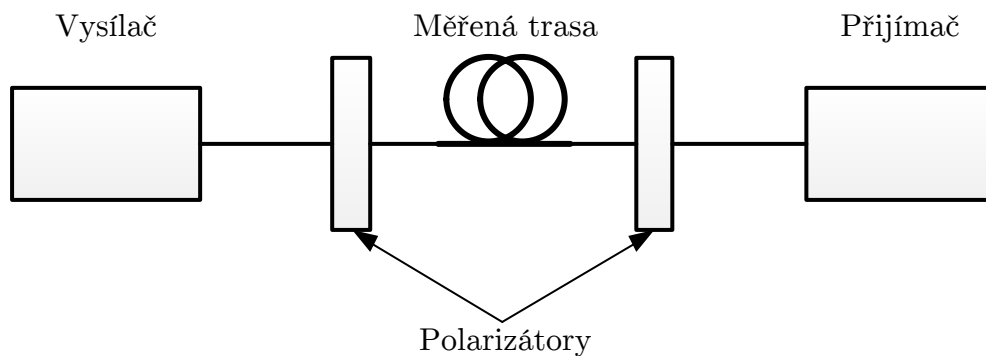
Obr. 3.4: EXFO FTB-500 s modulem FTB-5500B, převzato z [12]

### 3.3 Metoda skenování vlnové délky

Podstatou této metody je měření optického výkonu po průchodu optickou trasou v závislosti na vlnové délce procházeného záření. Jako zdroj záření neboli vysílač může být použita například širokospektrální LED dioda nebo laditelný laser. Za vysílačem se nachází polarizátor. Podle toho jaký použijeme zdroj záření musí být na straně přijímače zvolen detekční prvek, aby bylo možné provádět měření výkonu v závislosti na vlnové délce. Pokud bude použita širokospektrální LED dioda využijeme jako detektor optický spektrální analyzátor. Pro laditelný laser vystačí pouze měřidlo výkonu [1, 3].

Při metodě skenování vlnové délky musíme postupovat ve dvou krocích. V prvním kroku se měření provede přesně podle zmíněného obrázku 3.5, kde je obsažen





Obr. 3.5: Metoda skenování vlnové délky [5]

polarizátor i před detekčním systémem. Tímto měřením získáme spektrální závislost složky výkonu o určité polarizaci (dané polarizátorem)  $P(I)$ . V další části odstraníme polarizátor před detekčním systémem a poté změříme referenční hodnotu - spektrální závislost celkového výkonu  $P_{tot}(I)$ . Dalším krokem je poměr obou naměřených spektrálních průběhů  $P(I)/P_{tot}(I)$ . Z daného poměru vyplývá spektrální závislost změny polarizace výstupního záření a z toho lze výpočtem stanovit hodnotu PMD optické trasy. Pro stanovení PMD se často užívá rychlé Fourierovy transformace, která převádí naměřené spektrální výsledky přímo do časové oblasti. Z důvodu nutnosti měření ve dvou krocích je metoda skenování vlnové délky méně používanější. Další nevýhodou je náchylnost metody na vibraci vlákna [1, 6].

### 3.4 Měření s optickým polarizačním reflektometrem P-OTDR

Měření pomocí reflektometru P-OTDR je založeno na využití známé metody měření zpětného Rayleighovského rozptylu a Fresnelova odrazu ve vlákne. Do vlákna je poslán sled impulzů a ty jsou pozorovány při odrazu zpět vlivem Rayleighova zpětného rozptylu. K Fresnelovým odrazům dochází při dopadu světla na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu. S analyzátozem P-OTDR můžeme určit, které úseky pro dané vlákno mají zvětšenou hodnotu koeficientu PMD. Toho se využívá při nasazování velkých páteřních sítí, protože jeden několikakilometrový úsek ze zvýšeným PMD nám nasazení optické trasy může znemožnit. Tento úsek může výrazně ovlivnit přenosové parametry optické trasy. Pokud zjistíme o který úsek se jedná, můžeme pak provést například výměnu daného úseku, zvolit jiný typ vysokorychlostního vlákna nebo tento úsek v síti zcela obejít [1, 4].

### 3.4.1 Měřič P-OTDR

Pro měření pomocí reflektrometru P-OTDR může být použit měřicí modul EXFO FTB-5600. Tento modul má tři sloty a je osazen do platformy EXFO FTB-500, která poskytuje distribuované měření PMD na optických trasách. Může měřit rozložení PMD podél optické trasy a také stanovovat hodnoty PMD jednotlivých úseků trasy. Je vhodný pro měření podzemních i závěsných kabelů. Vložený modul je vhodný pro testování optických tras s přenosovými kapacitami: 10, 40 a 100 Gbit · s<sup>-1</sup> [12].



Obr. 3.6: EXFO FTB-500 s modulem SFTB-5600, převzato z [12]

## 3.5 Polarimetrické metody

Polarimetrické metody pro měření polarizační vidové disperze jsou založeny na komplexní analýze optického záření, které prochází měřeným vláknem nebo součástkou. Tyto metody nám dávají komplexní analýzu stavů na vstupu a na výstupu vlákna nebo také na zařazených součástkách. Výše zmíněné metody měření PMD zjištění těchto parametrů neumožňovaly. Polarimetrické metody jsou referenčními měřicími metodami, které jsou stanoveny ITU. Mezi tyto metody patří:

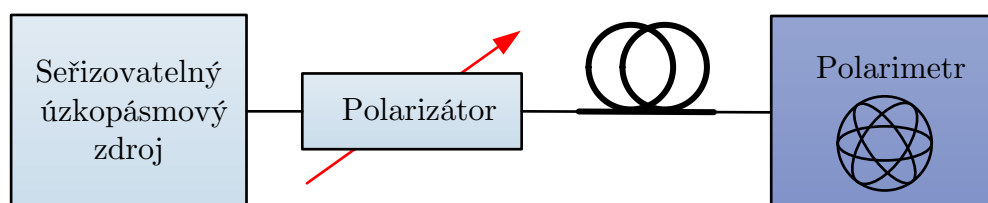
- metoda analýzy Jonesovy matice,
- metoda Poincarého koule,
- metoda polarizačních stavů.

Díky těmto metodám můžeme určit jaký vliv má měřené vlákno nebo součástka na stav polarizace. Těmito metodami dosahujeme velmi vysoké přesnosti měření

a také možnosti přesné reprodukovatelnosti měření. Nevýhodou těchto metod je však jejich časová náročnost a jejich náchylnost na okamžité změny PMD, které jsou způsobeny podmínkami okolního prostředí. Například změna teploty a vibrace. Z daných důvodů se tyto metody používají spíše jen v laboratořích a nejsou tedy vhodné pro měření „v terénu“. Nejčastější uplatnění je ve firmách, které pracují na vývoji a výrobě optických součástek [3].

### 3.5.1 Metoda analýzy Jonesovy matice

Potřebným vybavením této metody je seřizovatelný úzkopásmový zdroj se třemi lineárními polarizátory. Koncovou součástí je polarimetr [7].



Obr. 3.7: Zapojení metody analýzy Jonesovy matice [7]

Pomocí tří známých stavů polarizovaného světla umožňuje polarimetru získat Jonesovy matice. Tyto hodnoty matic nám umožňují pomocí sousedních dvojic vlnových délek stanovit hodnotu DGD. PMD se pak následně vypočítá jednoduchým průměrováním získaných hodnot DGD na vlnových délkách [7].

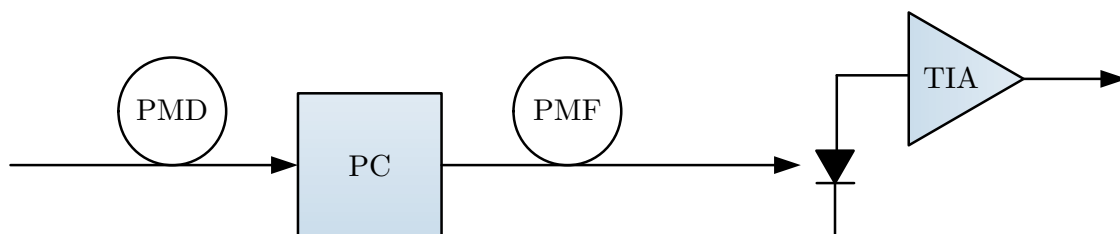
## 4 METODY KOMPENZACE PMD

Metody pro kompenzaci PMD se užívají pro snížení účinků PMD aniž by jsme museli v optické trase vyměňovat optické vlákno. Neurčitý charakter PMD parametru zamezuje úplnému odstranění tohoto jevu. Mezi často navrhované možnosti pro zmenšení vlivu PMD ve WDM sítích patří kódování FEC (*Forward Error Correction*) a redundance vlnových délek. Avšak kompenzaci PMD je nutné často řešit nezávisle nebo ve spolupráci se záložními systémy. V současné době se nejčastěji používají tři základní druhy kompenzace PMD, které jsou rozděleny podle použitých součástí a technických oblastí [11]:

- optická kompenzace PMD,
- optoelektronický PMD kompenzátor,
- elektronický PMD kompenzátor.

### 4.1 Optická kompenzace PMD

Mezi jednu z nejběžnějších metod kompenzace PMD patří optická kompenzace. Optické kompenzátory vyžadují polarizační radič-kontrolér (PC) a délku polarizačního udržovacího vlákna PMF (*Polarization-maintaining fiber*) jak můžeme vidět na obrázku 4.1. PC je zde použit pro vyrovnávání polarizace světelného signálu tak, že vyrovnává PSP v PMF. PMF je vlákno, které bylo záměrně vyrobeno s velkým, ale řízeným dvojlomem. Díky tomu může být použito pro vytvoření specifických velikostí DGD. Tímto způsobem, může být snížen výkon rychlé SOP o hodnotu rovnající se DGD v PMF, což vede za následek celkového snížení DGD [11].



Obr. 4.1: Optický kompenzátor[11]

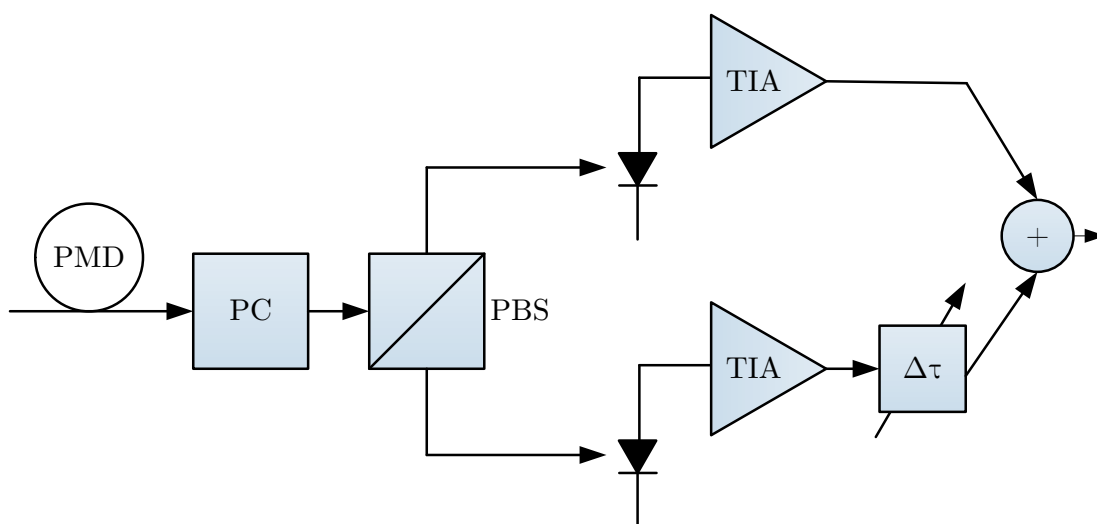
Složitější kompenzátory mohou být konstruovány s výměnnou délkou PMF s proměnným zpožděním umožňujícím zrušení libovolných velikostí DGD nebo pomocí vícefázového PC-PMF stupně. Zvýšením tohoto stupně volnosti se zvyšuje i přesnost kompenzace. Optická kompenzace má své výhody, ale samozřejmě i nevýhody. Mezi hlavní nevýhodu patří velmi nákladné a relativně velké optické komponenty.

Dalším problémem je dynamický charakter PMD a tudíž musí být kompenzátory adaptivní těmto dynamickým změnám. Adaptace kompenzátorů na tyto změny je velmi obtížná, protože optické komponenty nejsou dostatečně flexibilní [11].

## 4.2 Optoelektronický PMD kompenzátor

Optoelektronický kompenzátor je systém, který zahrnuje optickou tak i elektrickou část pro kompenzaci PMD. Tento systém, který je uveden na obázku 4.2, pracuje na principu rozdělení přijatého světelného signálu do jeho dvou polarizačních režimů pomocí PC a rozdělovače polarizace paprsků PBS (polarization beam splitter). Výsledné světelné signály jsou pak převedeny na elektrické signály pomocí dvou oddělených fotodiód s transimpedančními zesilovači (TIA-photodiode-transimpedance amplifier). Tyto zesilovače jsou svými přenosovými vlastnostmi vhodné k rychlému zpracování signálů. Elektrický signál odpovídající světelnému signálu je poté v rychlé SOP zpožděn o interval, který je roven DGD. Nakonec jsou oba signály znovu spojeny do podoby přijatého signálu, který je ale bez účinku PMD.

Hlavní výhodou optoelektronické kompenzace je, že některý kompenzační hardware přesunut z optické části do elektrické, díky tomu je zde zvýšena úroveň integrace systému. Nicméně optoelektronická kompenzace ještě vyžaduje navíc optické komponenty (PC a PBS), takže větší integrace se dá dosáhnout pomocí elektrického systému. Rozšíření systému však ještě výrazně zvyšuje náklady optoelektronického systému [11].

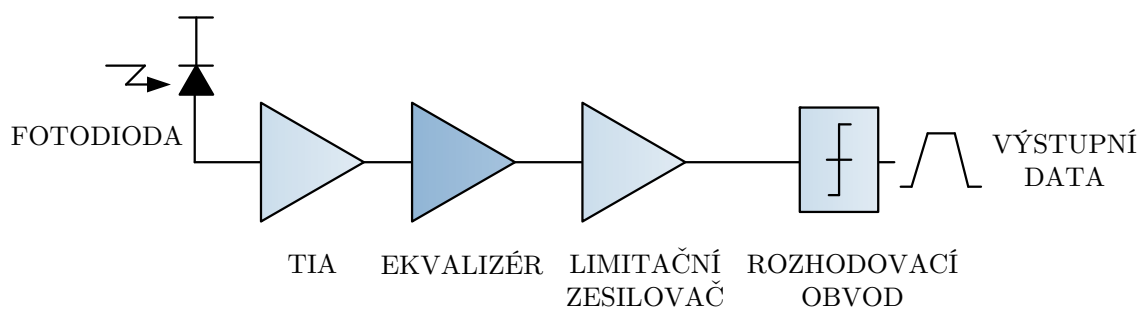


Obr. 4.2: Optoelektronický kompenzátor[11]

### 4.3 Elektronický PMD kompenzátor

Elektronická kompenzace PMD se provádí vyrovnaním přijatého signálu poté, co byl převeden ze světla na elektřinu pomocí fotodiody a TIA. Tento systém je uveden na obrázku 4.3. Elektronická úprava je mnohem atraktivnější, jelikož pomocí ní lze dosáhnout vyššího stupně integrace a tím se i snižují náklady ve srovnání s optickým a optoelektronickým řešením. Vysoká úroveň integrace je důležitá zejména ve WDM systému, ve kterém se PMD kompenzace vyžaduje pro každý kanál. Také adaptace na změny PMD za různých podmínek se relativně snadněji provedou v elektronické podobě. Zavedené adaptační algoritmy, které jsou snadno dostupné, jako je například algoritmus LMS (least mean square), pomohou k rychlejší adaptaci na změny.

Můžeme tedy říct, že elektronická kompenzace ve výsledku podstatně zlepší signál. Elektronická kompenzace je však oproti optickým kompenzacím o něco horší v kvalitě vykonání kompenzace a také požaduje vysokorychlostní elektroniku pro lepší výkon [11].



Obr. 4.3: Elektronický kompenzátor[11]

## 5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ PMD

Praktická část bakalářské práce se skládá ze dvou automatizovaných měření PMD na optické trase v Brně a z měření PMD ve vyrobené termokomoře se stabilizací a nastavením teploty. Obě měření byly provedeny pomocí speciálního měřicího přístroje EXFO FTB-200 s modulem EXFO FTB-5700 pro měření PMD.

První část měření na venkovní optické trase v Brně se prováděla pomocí automatizovaného programu, ve kterém se nastavují vstupní parametry pro dlouhodobé měření. Poté byl proveden import výsledků z měřicího přístroje do CSV souborů s výpisem dat z HTML souborů. K měření byly ještě využity údaje o venkovní teplotě z meteorologické stanice, jenž se nachází poblíž optické trasy, data měly opět formát CSV souborů. Následně byly tyto soubory zpracovány do grafů v interaktivním programovém prostředí MATLAB, kde byl vytvořen skript pro práci s měřenými údaji z CSV souborů.

Druhá část měření pomocí vyrobené termokomory byla založena na nastavování teploty v termokomoře a následného proměření hodnoty PMD na optickém vlákně. Hodnoty PMD byly zaznamenány do Excelu a poté importovány do programového prostředí MATLAB, kde z měřených hodnot byly vytvořeny grafy.

## 5.1 Poznatky měření PMD z nezávislého zdroje

Měření polarizační vidové disperze se v této době již stalo standardem u současných vysokorychlostních sítí. Mezi firmy měřící optické trasy a jejich parametry patří například firma Mikrokom. Ta provádí měření pomocí PMD analyzátoru na bázi interferenční metody s polarizovaným širokospektrálním zdrojem LED záření. K měření je potřeba jen měřené vlákno a žádná komunikace analyzátoru PMD se zdrojem záření neprobíhá. Rychlost měření je v řádu jednotek sekund a obsluha přístroje je jednoduchá. Výsledné údaje měření jsou celková hodnota PMD optické trasy v jednotkách [ps]. Při zadání délky vlákna trasy je změřena také hodnota koeficientu PMD vlákna [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]. Měřicí soustava umožňuje měření PMD pro velmi dlouhé trasy.

Měření byly prováděny na různých typech kabelů (závěsné, kombinovaná zemnicí lana, ovíjené, uložené v zemi) a z těchto měření byly vyvozeny různé obecné poznatky [3]:

- při udaném koeficientu PMD vláken kabelu lze určit předběžný odhad délky celkové trasy, směrodatnou hodnotu však zjistíme až samotným měřením,
- z analýzy nevyplývá závislost PMD na jiných přenosových parametrech například na útlumu,
- starší optické trasy vykazují mnohem vyšší hodnotu PMD,
- u tras ze zvýšenou hodnotou PMD je vhodné měřit je v různých ročních obdobích a sledovat například vliv teploty.



## 5.2 Měřicí soustava

Základní součástí měřicí soustavy je univerzální měřicí přístroj EXFO FTB-200 (obr. 5.1) s programem pro měření PMD. Tato kompaktní měřicí platforma lze osadit až 11 modulů s různými testovacími aplikacemi. Pro měření PMD využíváme měřicí modul EXFO FTB-5700.

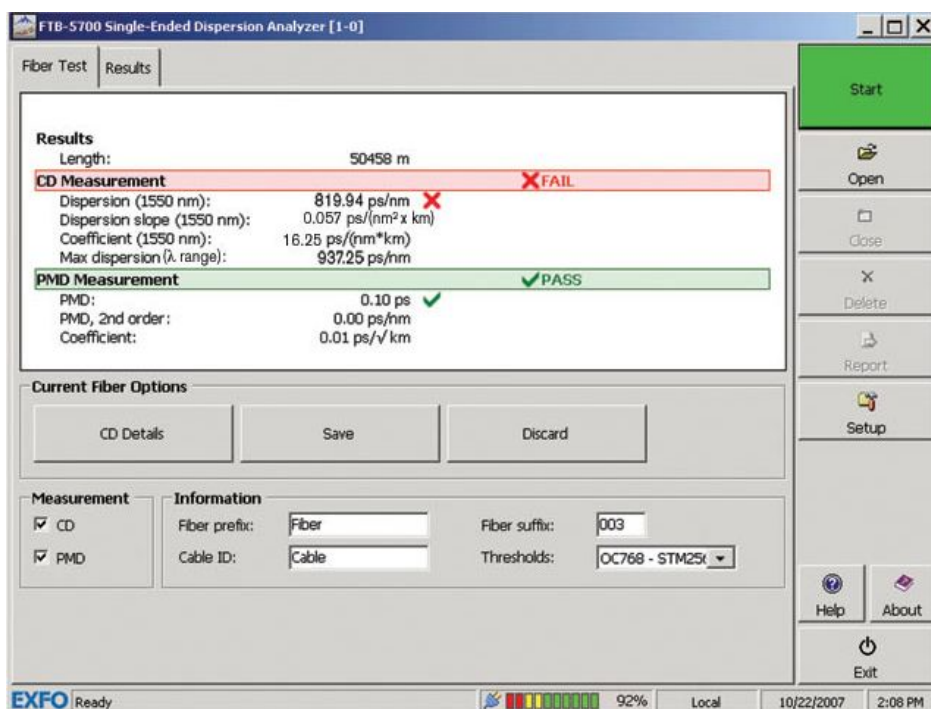
Tento přístroj umožňuje rychlé a jednoduché testování optických tras z jednoho konce na druhý konec vlákna s využitím Fresnelova odrazu na konci vlákna. Umožňuje měření chromatické i polarizační vidové disperze zároveň. V následující tabulce 5.1 jsou uvedeny toleranční parametry PMD pro námi využitý modul FTB-5700. Modul je schopen měřit optická vlákna do délky až 120 km [12].



Obr. 5.1: Měřicí platforma EXFO FTB-200, převzato z [12]

Tab. 5.1: Tabulka tolerance PMD pro modul EXFO FTB-5700 převzato z [12]

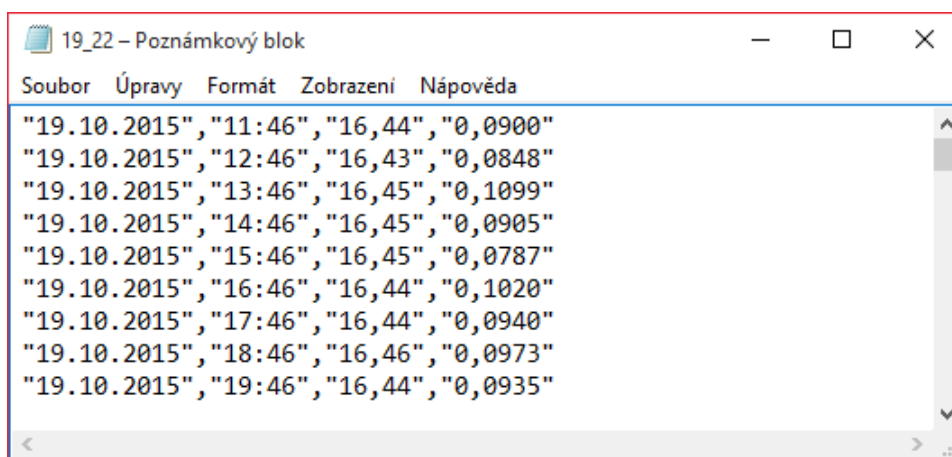
Tolerance PMD			
Typ služby	100GBASE-LR4	100GBASE-ER4	100 GBASE-ER4
Provozní vzd. [km]	10	30	40
DGD_max [ps]	8	10,3	10,3
PMD_max [ps]	2,5	3,2	3,2



Obr. 5.2: Vzhled prostředí pro měření disperzí

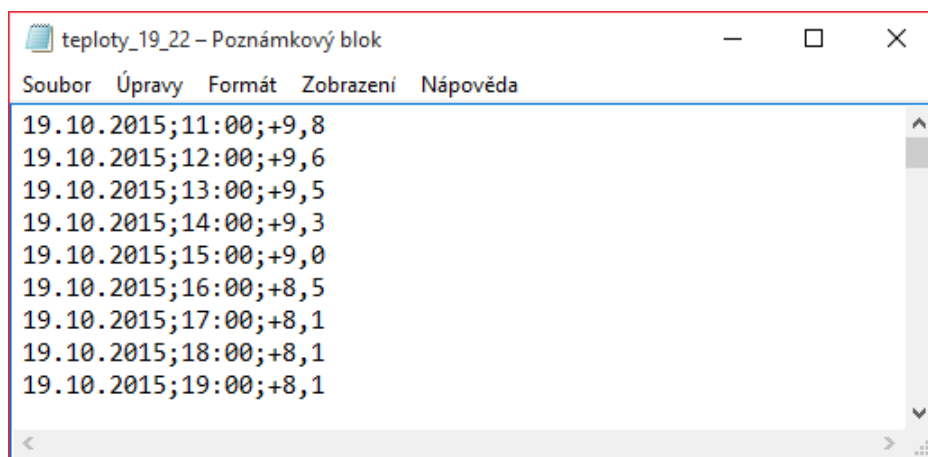
### 5.2.1 Forma výpisu dat do CSV souborů

Naměřená data jsou uložena ve formě CSV souborů v adresáři měřicího přístroje a obsahují údaje o datu a času měření, dále hodnoty chromatické disperze a hodnoty, která nás zajímá nejvíce, a to PMD viz obrázek 5.3.



Obr. 5.3: Formát výpisu dat z měřicího přístroje do CSV souboru

Podobně jako soubory z měřeného přístroje vypadají teplotní údaje z meteorologické stanice stažené z internetového zdroje: <http://tubo.fce.vutbr.cz/new/meteoExport.asp>. V obrázku 5.4 je forma výpisu dat. Opět začínána datem, poté časem a údajem o teplotě ve °C.

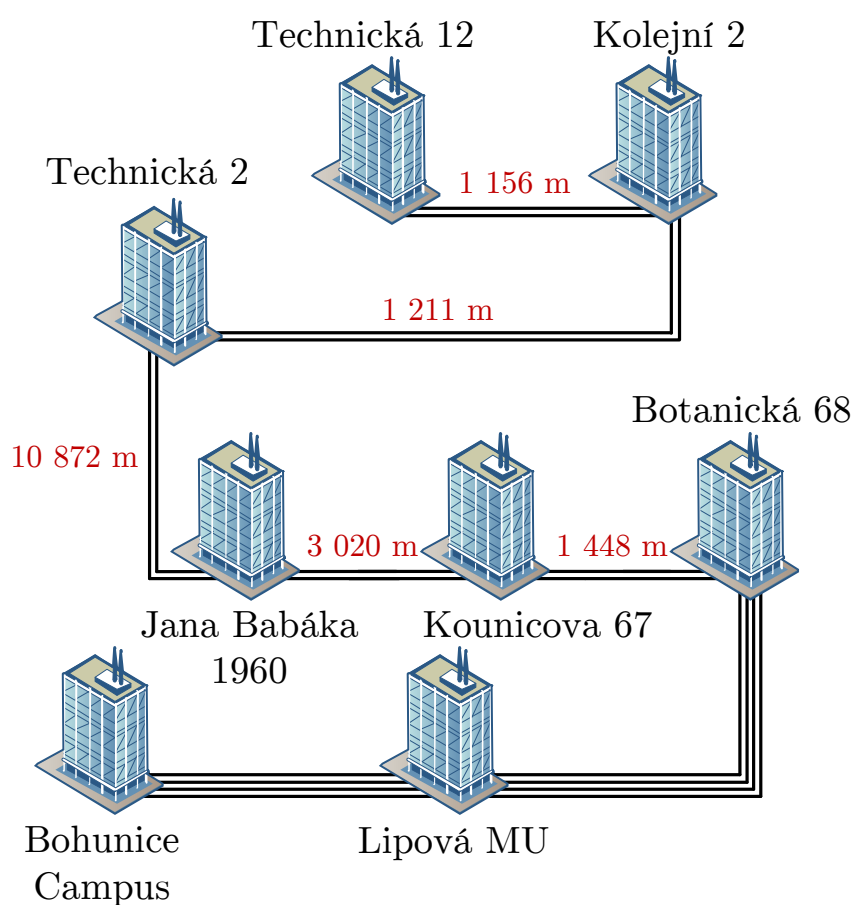


Obr. 5.4: Formát výpisu dat o teplotních údajích do CSV souboru

## 5.3 Základní parametry měřené trasy

### Technická 12–Campus Bohunice

Měřená trasa se nachází v Brně, kde její začátek je v budově Technická 12. V této budově, konkrétně ve školní laboratoři SC 5.52 bylo provedeno napojení do trasy. Optická trasa vede venkovním prostředím, kde je uložena v nezámrzné hloubce. Dále přes různé budovy a serverové místnosti. V trase jsou využívány převážně dva typy vláken. Prvním je vlákno G.652.D a druhým je vlákno G.655.D. Celková délka měřené trasy dosahuje  $l = 58$  km.



Obr. 5.5: Měřená trasa Campus Brno

## 5.4 Provedená měření PMD na reálné trase

Celkově se první část měření na optické trase Technická 12–Campus Bohunice skládá ze dvou scénářů, které se odehrávaly v různých obdobích. Měření bylo prováděno z laboratoře SC 5.52, kde se připojila měřící platforma EXFO FTB-200 s osazeným modulem FTB-5700 do optické trasy. Tento přístroj umožňuje rychlé a jednoduché testování optických tras z jednoho konce vlákna s využitím Fresnelova odrazu na konci vlákna.

Na přístroji byl spuštěn automatizovaný program pro dlouhodobá měření. Program umožňuje zvolení celkové doby měření od 30 minut až po 7 dní. Dále se nastaví perioda měření (15 min, 30 min, 1 hodina, 3 hodiny, 6 hodin). Po vybrání časových parametrů se tlačítkem START přesuneme do nastavení měření disperzí.

První měření bylo nastaveno na celkovou dobu 7 dní a perioda měření byla 1 hodina. Každou hodinu tedy probíhalo vypsání data, času a hodnoty PMD do CSV souboru. Druhé měření bylo nastaveno na 3 dny a vypisování bylo opět každou hodinu. Z každého měření je vytvořen samostatný scénář.

Získané CSV soubory byly poté importovány a vhodně upraveny skriptem vytvořeným v interaktivním prostředí MATLAB. Tento skript obsahuje vytvoření grafů z obou měření.

### 5.4.1 Výsledky měření

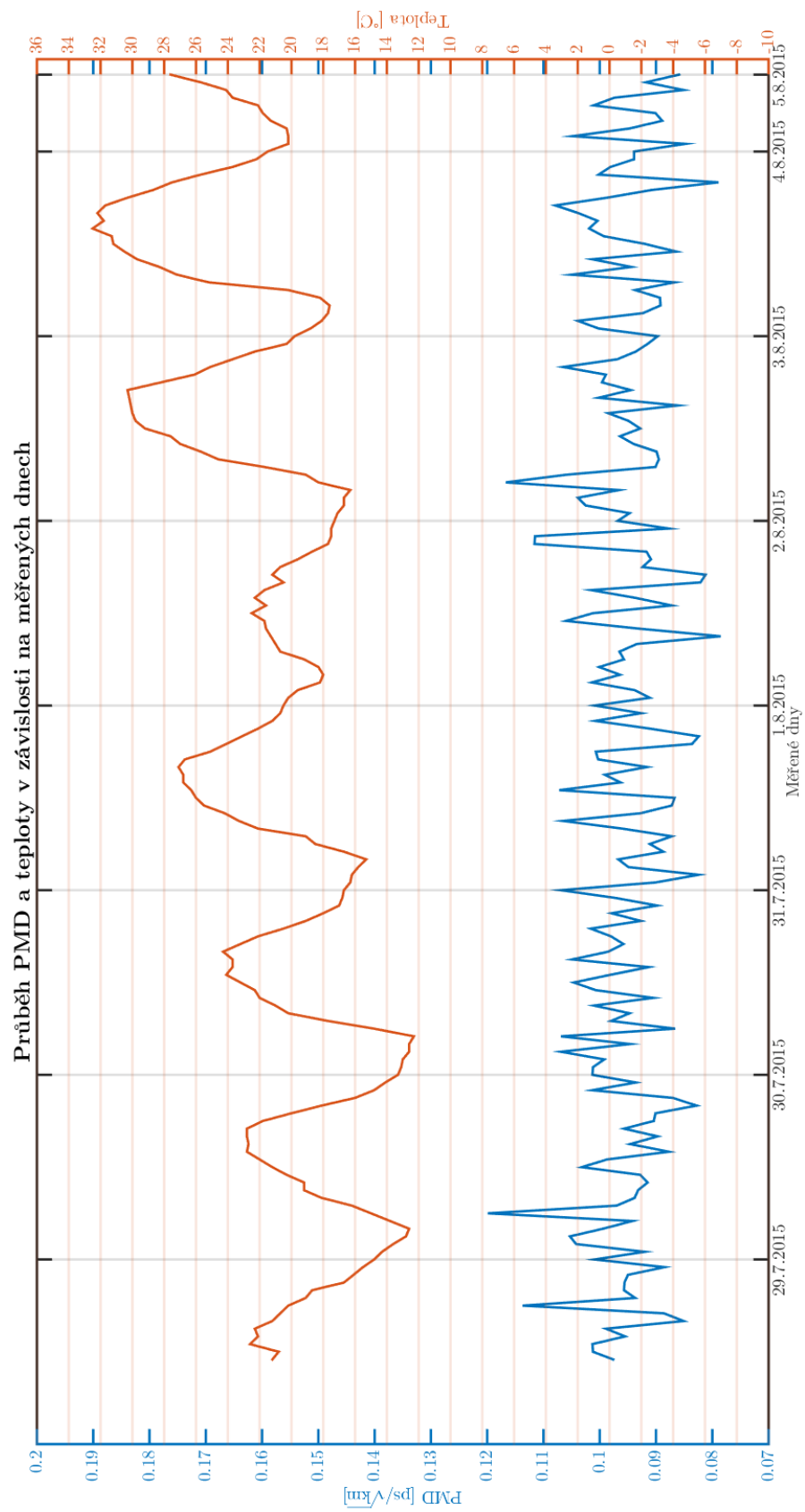
Výsledky dvou dlouhodobých měření hodnoty PMD jsou rozděleny do dvou scénářů, kde se nachází informace a výsledné grafy k těmto měřením.

### 5.4.2 Scénář 1

Náměr pro scénář jedna byl naměřen v létě. V následující tabulce 5.2 můžeme vidět, kdy bylo měření prováděno a jaké byly naměřeny mezní parametry PMD a jaké byly v tomto období mezní teploty.

Tab. 5.2: Parametry scénáře 1

První náměr hodnot PMD:	
Začátek měření	29.7.2015
Konec měření	5.8.2015
PMD_max [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,1199
PMD_min [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0785
Teplota_max [°C]	32,5
Teplota_min [°C]	12,3



Obr. 5.6: Graf závislost PMD a teploty na měřených dnech (29.7.–5.8. 2015)

V přiloženém grafu 5.6 můžeme odečíst, že závislost hodnoty PMD na měřených dnech je velmi nestálá. Tyto výkyvy hodnoty PMD mohou způsobovat například klimatické podmínky jako teplota, změna tlaku na vlákno nebo různé vibrace v okolí vlákna. Největší hodnota PMD byla změřena dne 30.7. 2015 okolo 6:00 ráno, a to 0,1199 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  v tento čas dosahovalo venkovní teplota 15 °C. Naopak nejmenší hodnota PMD byla zaznamenána dne 2.8. 2015 v 9:00 a čítala 0,0785 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  při teplotě 21,3 °C.

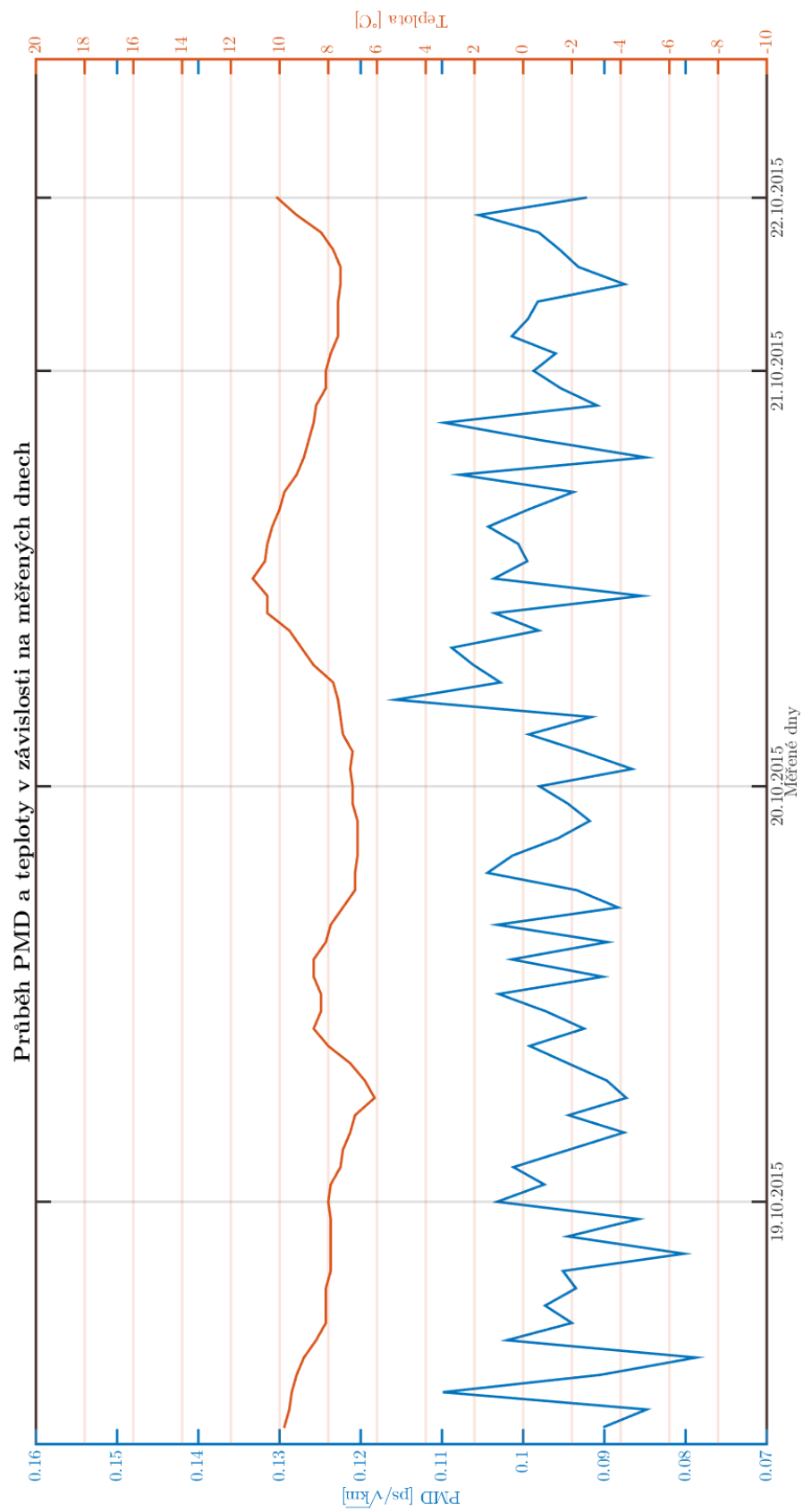
### 5.4.3 Scénář 2

Druhý náměr hodnot byl těsně před začátkem podzimu. Mezní údaje o tomto měření můžeme najít v tabulce 5.3.

Tab. 5.3: Parametry scénáře 2

Druhý náměr hodnot PMD:	
Začátek měření	19.10.2015
Konec měření	22.10.2015
PMD_max [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,1157
PMD_min [ps/ $\sqrt{\text{km}}$ ]	0,0787
Teplota_max [°C]	11,1
Teplota_min [°C]	6,1

V následujícím grafu 5.7 jdou opět vidět velké změny hodnot PMD. Nejvyšší hodnota PMD jak můžeme odečíst z grafu byla ze dne 21.10. v 5:00 ráno a její hodnota byla 0,1157 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Teplota venku při této hodnotě byla 7,6 °C. Nejnižší hodnota byla naměřena první den tohoto měření v 15:00, a to 0,0787 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  za teploty 9 °C. Druhý den měření se hodnota trochu ustálila, ale další den byly opět větší změny hodnoty. Opět můžeme říci, že na to měly vliv okolní vlivy prostředí.



Obr. 5.7: Graf závislost PMD na měřených dnech (19.10.–22.10. 2015)

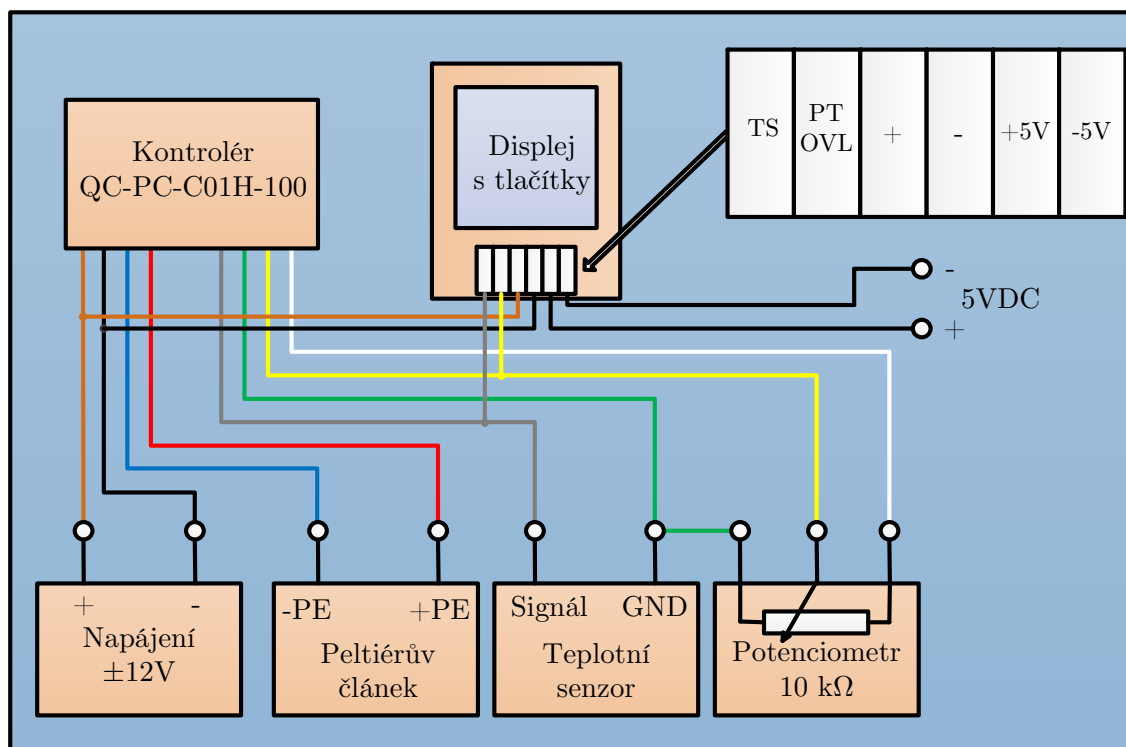


## 5.5 Výroba termokomory pro teplotní stabilizaci

Pro druhou část měření bakalářské práce jsme museli navrhnout a sestavit malou stabilizační termokomoru. Tuto komoru jsme navrhli a vyráběli společně s kolegou Tomášem Holíkem, jelikož jsme ji oba využili pro následné měření.

Základem výrobku je kontrolér QuickCool QC-PC-C01H-100 a displej QC-PC-D-100, který umožňuje ovládání Peltierova článku. Funkce kontroléru spočívá v ovládání Peltierova článku umístěného na víku hliníkové krabičky. Základní vlastnosti Peltierova článku napájeného napětím 12 V je z jedné strany topit a z druhé strany chladit. Důležitý je proto odvod tepla, případně chladu pomocí chladiče. Využili jsme proto vodní chlazení Cooler Master Seidon 120V ver.2 (čerpadlo + ventilátor), které je jak se ukázalo velmi účinné. Čerpadlo je umístěno na Peltierově článku a přišroubováno do víka hliníkové krabičky. Pro lepší tepelnou vodivost je zde aplikovaná teplovodivá pasta. Ventilátor a čerpadlo mají samostatné napájení 12 V a pro případné omezení vlivů při měření jsme tyto části napojili na samostatné vypínače, pomocí kterých můžeme čerpadlo a ventilátor zapnout a vypnout při měření.

Dále kontrolér snímá teplotu pomocí teplotního senzoru umístěného v hliníkové teplotní komoře, která je dále zaizolovaná v plastové krabici a volná místa jsou vyfoukány montážní pěnou pro větší teplotní stabilitu. Nastavení teploty, kterou vidíme na displeji, se provádí pomocí víceotáčkového potenciometru (10 k $\Omega$ ).



Obr. 5.8: Propojení kontroléru s dalšími součástmi [15]

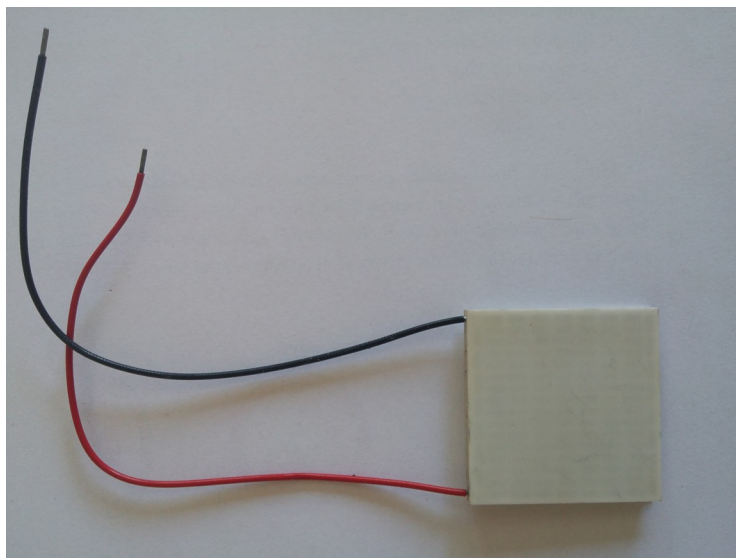
Zapojení bylo provedeno pomocí svorek a pomocného plošného spoje, na kterém byly tyto svorky umístěny. Propojení jednotlivých komponent bylo podle schématu na obrázku 5.8 a jeho barevného rozlišení, které je obsaženo v datasheetu [15].

Na obrázku 5.9 se nachází ovládací krabička s displejem, který ukazuje nahoře aktuální teplotu a dole teplotu požadovanou, neboli tu, kterou nastavíme pomocí víceotáčkového potenciometru. Na pravé straně první zhora je přepínač pro přepínání napájení Peltierova článku. Kde CH znamená chlazení a T naopak topení, s přepnutím musíme ještě nastavit požadovanou funkci pomocí ovládacích tlačítek na kontroléru. Mezi tlačítky se nachází signalizační dioda, která když svítí, tak signalizuje topení nebo chlazení. Záleží na našem nastavení. Pokud dosáhneme požadované teploty v termokomoře, dioda se vypne. Pod přepínačem napájení jsou dva kolébkové přepínače pro vypnutí a zapnutí ventilátoru a čerpadla. Jako poslední prvek je zde obsažen víceotáčkový potenciometr pro nastavení požadované teploty.



Obr. 5.9: Krabička se zabudovaným kontrolérem, displejem a ovládacími prvky

Na obrázku 5.10 můžeme vidět Peltierův článek, který je využit pro topení a chlazení termokomory.



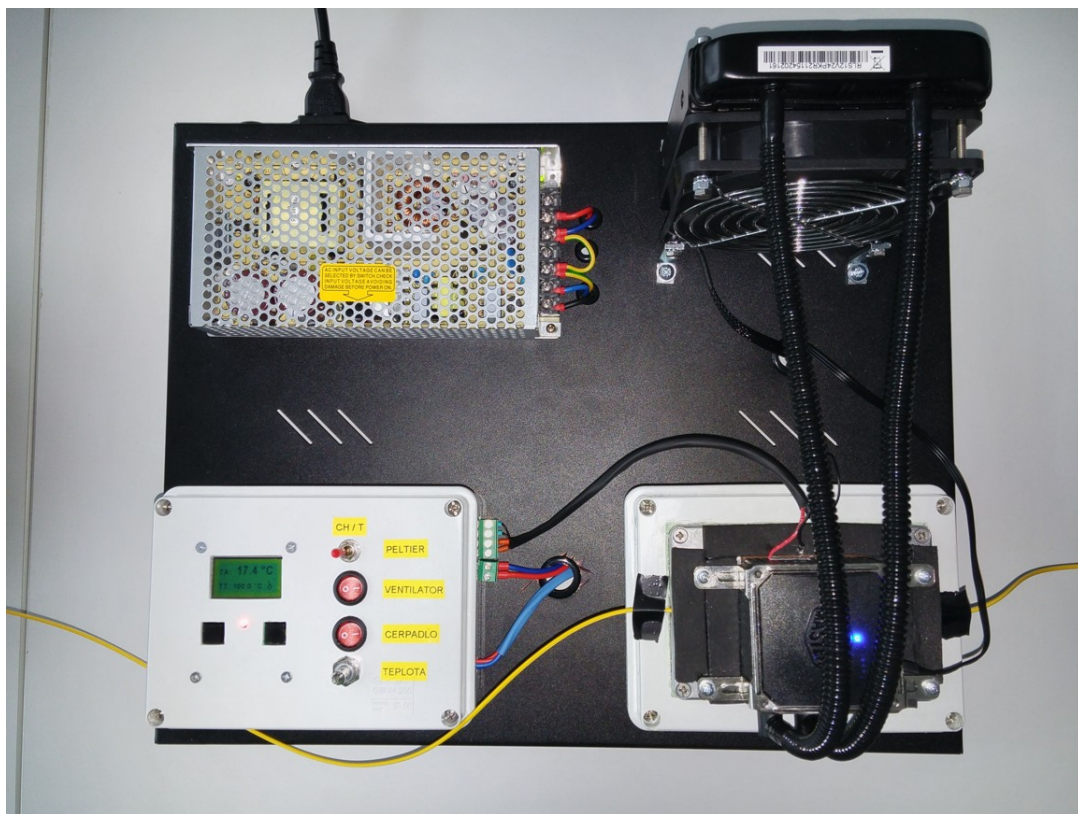
Obr. 5.10: Peltierův článek

V termokomoře je umístěn smotek optického vlákna typu G.652 o délce 1,5 m. Vláknem je uloženo tak, aby se nedotýkalo stran hliníkové krabičky a nebylo tak přímo ovlivněno. Vliv na vlákno má tedy pouze teplota uvnitř komory.



Obr. 5.11: Smotek vlákna v hliníkové termokomoře

Peltierův kontrolér a všechny další součástky sestavy jsou napájeny pomocí zdroje MEAN WELL, který je napájen ze sítě 230 V/50 Hz, má výstupní napětí 12 V a výstupní proud až 12,5 A. Při měření jsme zjistili, že odběr Peltierova článku společně s kontrolérem a vodním chlazením je něco málo přes 6 A.



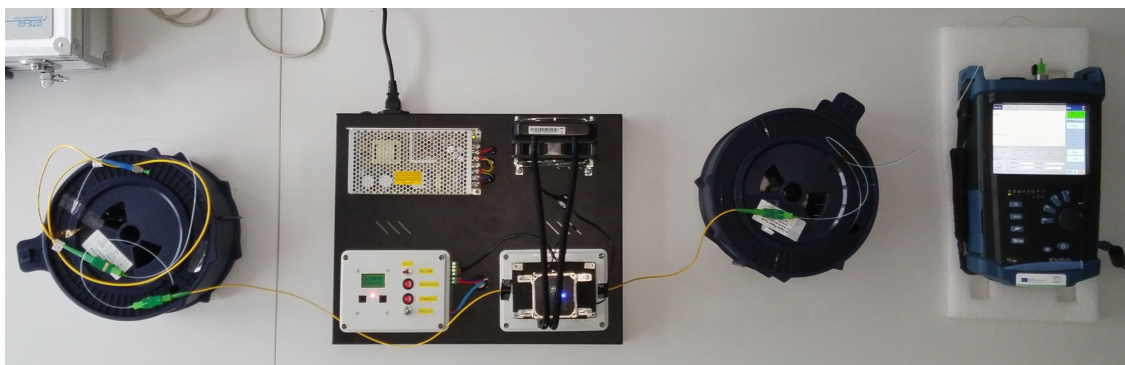
Obr. 5.12: Kompletní sestava termokomory i s optickým vláknem



## 5.6 Provedená měření PMD ve stabilizační termokoře

Měření PMD ve stabilizační komoře bylo provedeno v laboratoři SC 5.52 v budově Technická 12. V laboratoři musel být absolutní klid a stálé klimatické podmínky, aby bylo zamezeno vnějším vlivům na změnu hodnoty PMD. Měření bylo provedeno pomocí měřicí platformy EXFO FTB-200 s osazeným modulem FTB-5700.

Celá sestava měření (obr. 5.13) se skládala z měřicího přístroje EXFO FTB-200 do kterého bylo napojeno optické vlákno G.652 o délce 3 km, následně byl napojen smotek optického vlákna, který byl umístěn v teplotní komoře. Na konci sestavy bylo opět napojeno optické vlákno o délce 3 km a na jeho konci byl použit patch kabel, kde konektor byl FC s rovným broušením, čímž bylo docíleno dostatečného odrazu signálu. Optické vlákna byly nové, tím i výsledky změřeného koeficientu PMD byly podstatně menší než při měření na venkovní optické trase.



Obr. 5.13: Zapojení celé měřicí sestavy

Měření bylo rozděleno na dvě části. U prvního měření bylo zapnuto čerpadlo s ventilátorem a u druhého měření byly obě součásti vypnuty. Tento způsob měření byl proveden proto, aby jsme zjistili, jak velký vliv mají vibrace způsobené čerpadlem a ventilátorem na hodnotu PMD.

Pomocí kontroléru se nastavovala teplota stabilizační termokomory a to v rozmezí od 10 do 60 °C skrokem 5 °C. Při nastavování a stabilizování teploty pod teplotu okolí (okolo 23 °C) se teplota udržovala o něco hůře než u vysokých teplot a jelikož každé měření trvalo dvě minuty, docházelo k malé změně teploty v termokomoře. Z následných naměřených hodnot koeficientu PMD byla spočítána odchylka od referenční hodnoty vyjádřená v %, kterou jsme určili jako hodnotu při 25 °C, jelikož se nejvíce blížila pokojové teplotě. Pro každou teplotu byly provedeny tři náměry hodnoty PMD pro lepší vyhodnocení. Ze změřených hodnot byly pomocí MATLABu vykresleny tři grafy.

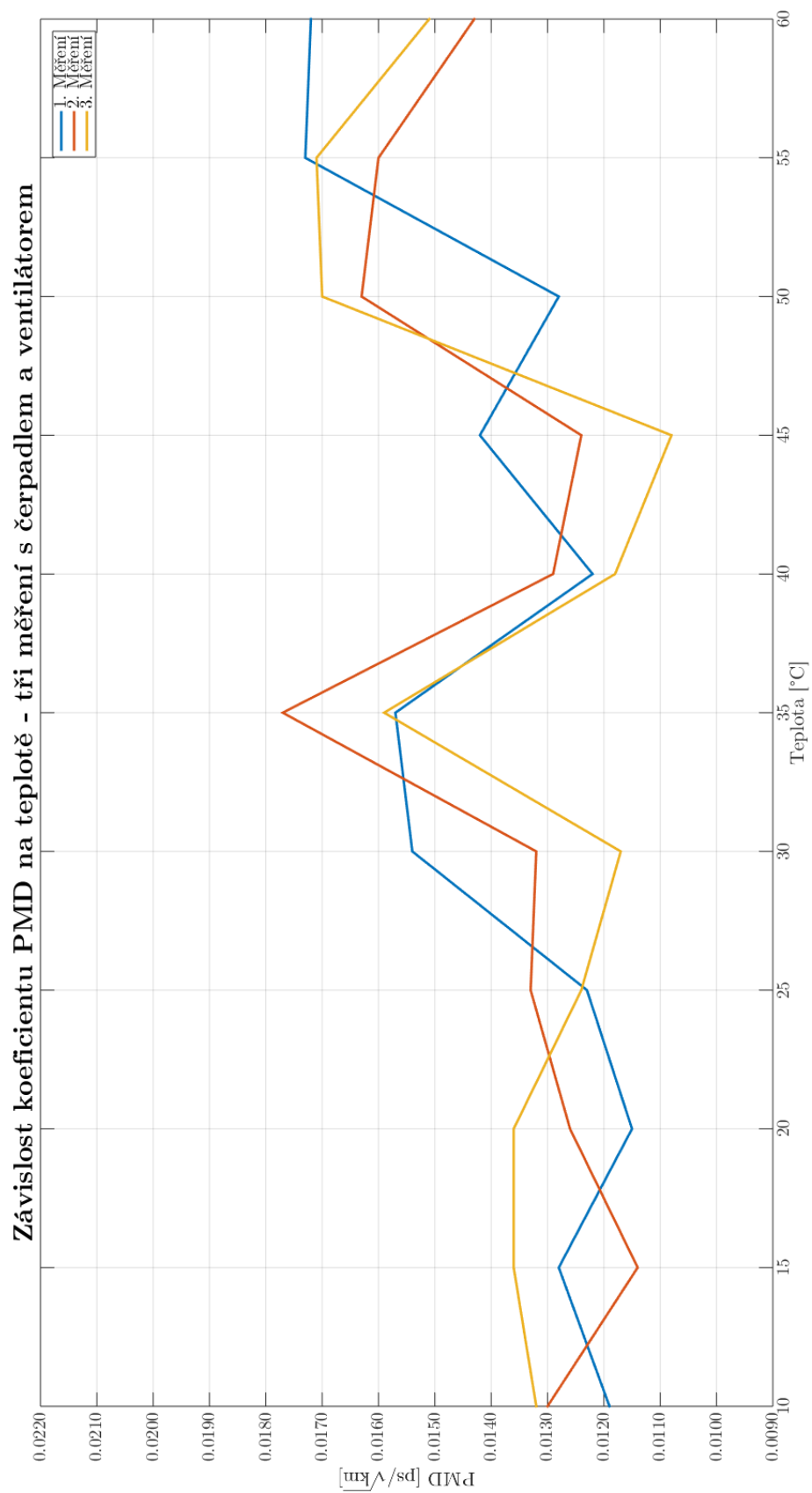
### 5.6.1 Tabulky, grafy a jejich zhodnocení

Tab. 5.4: Tabulka s hodnotami při měření se zapnutým čerpadlem a ventilátorem

Čerpadlo a ventilátor zapnuto						
	1. Měření		2. Měření		3. Měření	
Teplota [°C]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Odchylka [%]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Odchylka [%]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Odchylka [%]
10	0,0119	11,2	0,0130	3,0	0,0132	6,5
15	0,0128	4,5	0,0114	14,9	0,0136	9,7
20	0,0115	14,2	0,0126	6,0	0,0136	9,7
25	0,0123	0,0	0,0133	0,0	0,0124	0,0
30	0,0154	14,9	0,0132	1,5	0,0117	5,6
35	0,0157	17,2	0,0177	32,1	0,0159	28,2
40	0,0122	9,0	0,0129	3,7	0,0118	4,8
45	0,0142	6,0	0,0124	7,5	0,0108	12,9
50	0,0128	4,5	0,0163	21,6	0,0170	37,1
55	0,0173	29,1	0,0160	19,4	0,0171	37,9
60	0,0172	28,4	0,0143	6,7	0,0151	21,8

Na prvním přiloženém grafu (obr. 5.15), kdy bylo při měření zapnuto čerpadlo i ventilátor, můžeme vidět charakteristiky tří měření, které jsou velmi podobné. Změny se u charakteristik jednotlivých měření začaly projevovat až při překročení pokojové teploty 23 °C, tato odchylka je vyjádřena v procentech. Referenční hodnota pro odchylku koeficientu PMD byla zvolena při 25 °C, jelikož při pokojové teplotě jsme ji neměli změřenou.

Po dosažení teploty 35 °C v termokoře se hodnota koeficientu PMD dostala při druhém měření na hodnotu 0,0177 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ , což je nejvyšší hodnota za těchto podmínek. Odchylka této hodnoty od referenční byla 32,1 %. Poté nastal pokles a při teplotách okolo 50 až 60 °C se koeficient PMD opět rapidně zvýšil. Zajímavostí je, že při teplotě 45 °C se hodnota koeficientu PMD dostala při třetím měření na velmi nízkou hodnotu, která byla 0,0108 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  a odchylka byla 12,9 %. Na jednotlivé měření mohly mít vlivy menší vibrace z čerpadla a ventilátoru, popřípadě z okolí.



Obr. 5.14: Graf závislosti PMD na teplotě se zapnutým čerpadlem a ventilátorem

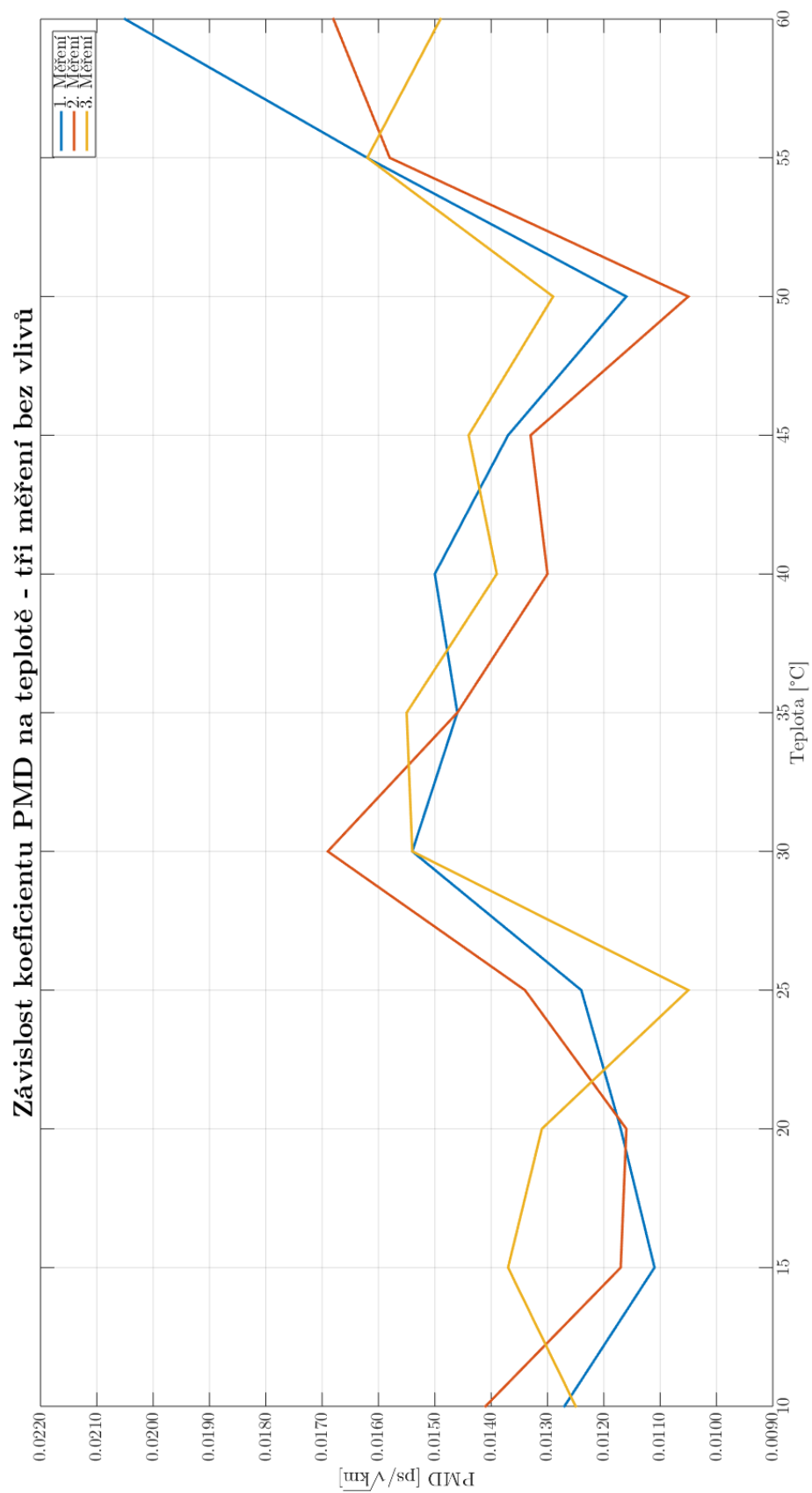
Tab. 5.5: Tabulka s hodnotami při měření s vypnutým čerpadlem a ventilátorem

Čerpadlo a ventilátor vypnuto						
	1. Měření		2. Měření		3. Měření	
Teplota [°C]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Odchylka [%]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Odchylka [%]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Odchylka [%]
10	0,0127	2,4	0,0141	5,2	0,0125	19,0
15	0,0111	10,5	0,0117	12,7	0,0137	30,5
20	0,0117	5,6	0,0116	13,4	0,0131	24,8
25	0,0124	0,0	0,0134	0,0	0,0105	0,0
30	0,0154	24,2	0,0169	26,1	0,0154	46,7
35	0,0146	17,7	0,0146	9,0	0,0155	47,6
40	0,0150	21,0	0,0130	3,0	0,0139	32,4
45	0,0137	10,5	0,0133	0,7	0,0144	37,1
50	0,0116	6,5	0,0105	21,6	0,0129	22,9
55	0,0162	30,6	0,0158	17,9	0,0162	54,3
60	0,0205	65,3	0,0168	25,4	0,0149	41,9

Druhý příložený graf (obr. 5.15) vykazuje zpočátku velmi podobný průběh charakteristik jako u prvního grafu (obr. 5.14), můžeme tedy říct, že vibrace z čerpadla a ventilátoru neměly téměř žádný vliv na měření hodnoty PMD. Charakteristika se po přesažení pokojové teploty opět dostala na vyšší hodnoty PMD, referenční hodnota pro odchylku byla opět při 25 °C.

Při teplotě 30 °C u druhého měření byla hodnota 0,0169 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  a odchylka čítala 26,1 %. Od této hodnoty u grafu nastal opět pokles všech charakteristik, kdy při 50 °C druhého měření se dostala hodnota PMD na velmi nízkou hodnotu 0,0105 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  a její odchylka byla 21,6 % od referenční. Po následném zvýšení teploty v termokomoře hodnota PMD razantně stoupla a při 60 °C byla naměřena nejvyšší hodnota ze všech provedených měření 0,0205 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  s odchylkou 65,3 %.





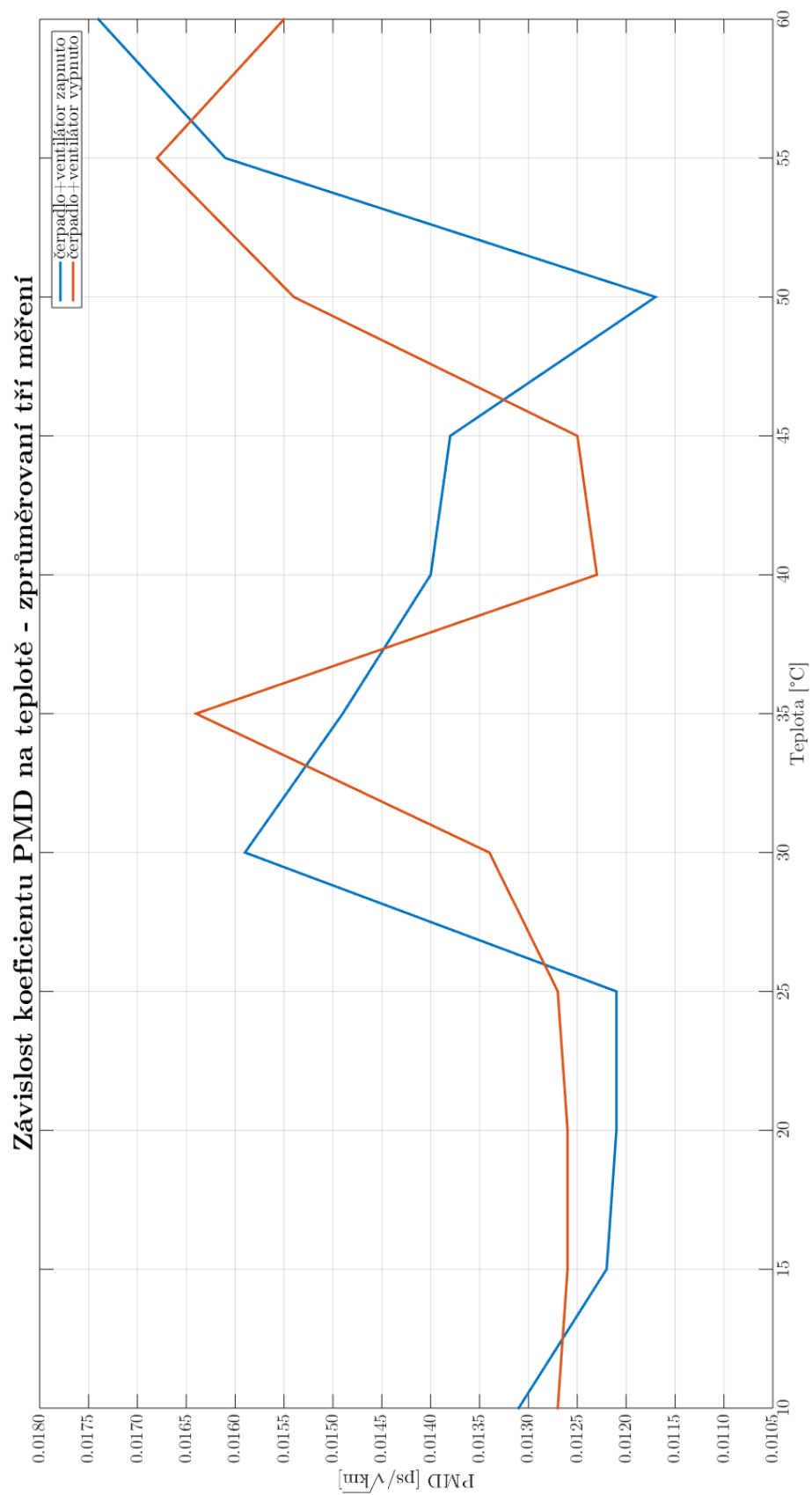
Obr. 5.15: Graf závislosti PMD na teplotě se vypnutým čerpadlem a ventilátorem

Tab. 5.6: Tabulka zprůměrovaných hodnot 3 měření pro obě situace

Teplota [°C]	Čerpadlo a ventilátor vypnuto		Čerpadlo a ventilátor zapnuto	
	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Ochylka [%]	PMD ps/ $\sqrt{\text{km}}$	Ochylka [%]
10	0,0131	8,3	0,0127	0,0
15	0,0122	0,8	0,0126	0,8
20	0,0121	0,0	0,0126	0,8
25	0,0121	0,0	0,0127	0,0
30	0,0159	31,4	0,0134	5,5
35	0,0149	23,1	0,0164	29,1
40	0,0140	15,7	0,0123	3,1
45	0,0138	14,0	0,0125	1,6
50	0,0117	3,3	0,0154	21,3
55	0,0161	33,1	0,0168	32,3
60	0,0174	43,8	0,0155	22,0

Třetí graf (obr. 5.16) vznikl z předešlých dvou grafů (obr. 5.14, 5.15), a to zprůměrováním tří hodnot měření při jedné nastavené teplotě pro každou situaci zvlášť. Vycházíme opět z referenční hodnoty při teplotě 25 °C.

Z grafu můžeme odečíst, že počáteční průběhy charakteristik se příliš nelišily. Až pak, okolo teplot 30 a 35 °C, se zprůměrovaná hodnota PMD razantně zvětšila oproti předchozím měřením a dosahovala až 0,0164 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  s odchylkou 29,1 % od referenční. Poté došlo k náhlému poklesu měřených hodnot, ale při 60 °C se dostala hodnota koeficientu PMD na nejvyšší zprůměrovanou hodnotu 0,0174 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  při měření se zapnutým čerpadlem a ventilátorem. Odchylka hodnoty dosahovala 43,8 %. Pokud bylo vypnuto čerpadlo s ventilátorem, tak se nejvyšší zprůměrovaná hodnota dostala na 0,0168 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  za teploty 55 °C v teplotní komoře, a to s odchylkou 32,3 %.



Obr. 5.16: Graf závislosti PMD na teplotě - zprůměrování tří hodnot pro obě situace

## 6 ZÁVĚR

Bakalářská práce je zaměřena na obecné seznámení s problematikou polarizační vidové disperze – PMD, která se projevuje u vysokorychlostních optických přenosů. Součástí práce byl návrh a provedení dlouhodobého měření hodnoty PMD a následuje zpracování výsledků do grafů pomocí programového prostředí MATLAB.

Začátek práce se věnuje optickým vláknům. Vypsány jsou základní vlastnosti a výhody použití optického vlákna pro přenos informací. Poté jsou popsány samotné typy optických vláken a jejich nejdůležitější parametry. Hlavní část teorie se zabývá polarizační vidovou disperzí. Zde je vysvětleno jak PMD vzniká, jak ovlivňuje přenos a jaké vlivy způsobují její změnu. Zmíněny jsou také limitní hodnoty PMD a různé matematické vzorce. Následuje část věnována několika měřícím metodám hodnoty PMD a také metodám pro možnost kompenzace PMD.

Praktická část se skládá ze dvou částí. První část se zabývá dlouhodobým měřením hodnoty PMD na optické trase. Na úvod jsou ještě zmíněny zajímavé poznatky měření z nezávislého zdroje. Poté již následuje seznámení z měřenou trasou Technická 12–Campus Bohunice, která se nachází v Brně a její celková délka dosahuje 58 km.

Měření bylo prováděno pomocí měřící soustavy od firmy EXFO. Základem soustavy byl měřící přístroj EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700 pro přesná měření disperzí na optických trasách. Celkově byly provedeny dvě dlouhodobá měření automatizovaným programem na zmíněné trase. Záznamy z těchto měření probíhaly každou hodinu a to do CSV souborů. Do souborů byly vypsány změřené údaje, které byly následně zpracovány pomocí MATLABu.

První měření trvalo 7 dní za teplého léta, kdy teplota dosahovala 32 °C a hodnota PMD se pohybovala v rozmezí 0,0785–0,1199 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Druhé měření bylo ke konci října, maximální teplota v tomto období byla jen něco málo přes 11 °C. Hodnota PMD se opět razantně měnila od 0,0787 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  po 0,1157 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . V přiložených grafech můžeme vidět velké změny hodnot PMD.

Druhá část praktické části se zabývá výrobou stabilizační teplotní komory a následného měření optického vlákna pomocí tohoto přípravku. Měření bylo navrženo z důvodu nedůvěryhodných závislostí měření PMD na venkovní teplotě, jelikož teplota, kterou jsme získali z meteostanic neodpovídá teplotě v okolí optického vlákna na venkovní měřené trase v Brně.

Pomocí vyrobené termokomory jsme si mohli teplotu v okolí optického vlákna nastavit a poté provádět měření. Teplotní rozsah byl zvolen od 5 do 60 °C s krokem 5 °C. Pro každou teplotu bylo měření provedeno třikrát, a to ještě za dvou

různých situací – se zapnutým nebo vypnutým čerpadlem a ventilátorem, aby jsme získali poznatky o vlivech menších vibrací. Z následných naměřených hodnot koeficientu PMD byla spočítána odchylka od referenční hodnoty vyjádřená v %, kterou jsme určili jako hodnotu při 25 °C, jelikož se nejvíce blížila pokojové teplotě. Každé měření trvalo dvě minuty a hodnoty byly zaznamenány do Excelu. Následně byly vypracovány grafy pomocí interaktivního programového prostředí MATLAB a hodnot importovaných z Excelu.

Z výsledných grafů můžeme vidět, že vliv zapnutého čerpadla a ventilátoru neměl značný dopad a výsledky měření byly podobné. Z grafů měření v teplotní komoře můžeme vidět, že s rostoucí teplotou hodnota koeficientu PMD stoupá, nejvíce nad teplotou okolí a poté při dosažení 50 °C a více, kdy byla v této oblasti naměřena nejvyšší hodnota koeficientu PMD ze všech měření 0,0205 ps/ $\sqrt{\text{km}}$  a odchylka byla 65,3 %. Tato odchylka je velmi velká a protože jsme použili nové vlákno, můžeme říct, že se zde vyskytuje velká závislost na okolních vlivech a teplotě. Samozřejmě je i možný vliv špatného změření této, proto bylo měření provedeno třikrát. Zajímavý je pokles hodnot v rozmezí okolo 40 a 45 °C, kdy dokonce u měření se zapnutým ventilátorem a chladičem hodnota PMD poklesla na 0,0108 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Odchylka u této hodnoty dosahovala 12,9 %. Tady se opět projevuje proměnný charakter PMD.

Hodnoty koeficientu PMD z měření v teplotní komoře mají oproti měření na venkovní trase daleko menší hodnoty a to je způsobeno použitím nových vláken. Venkovní vlákna jsou starší, opotřebená a nachází se v různých podmínkách, proto tento rozdíl hodnot. Při zvyšování teploty hodnota PMD v komoře stoupala, ale projevil se i její náhodný charakter. Ze všech přiložených grafů a tabulek můžeme vyvodit, že určitá závislost koeficientu PMD na teplotě zde je obsažena, protože odchylky od referenční hodnoty (hodnota koeficientu PMD při 25 °C) větší než 25 % při použití nového vlákna jsou příliš velké.

# LITERATURA

- [1] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 9788086785141.
- [2] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Nová metoda měření PMD optických tras*. [online]. Praha: Mikrokom s.r.o., 2007 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z:<http://bit.ly/1N5rsaZ>.
- [3] HÁJEK, Martin a Petr HOLOMEČEK. *Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovíkových optických tras* [online]. Praha: Mikrokom s.r.o. [cit. 2015-11-27]. Dostupné z:<http://bit.ly/10dDnk7>.
- [4] HÁJEK, Martin. *Zkušenosti s měřením polarizační vidové disperze (PMD) jednovíkových optických kabelových tras* [online]. Praha: Mikrokom s.r.o., 2002 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z:<http://bit.ly/1j2utKX>.
- [5] ŤUPA, Martin. *Polarizační vidová disperze - PMD*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011.
- [6] TURSKÝ, Aleš. *Polarizační vidová disperze*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.
- [7] LIETAERT, Gregory. *Testing Polarization Mode Dispersion in the Field* [online]. 2007 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: [http://www.fiberoptic.com/Fiber\\_Characterization/pdf/fom\\_field\\_testing\\_pmd.pdf](http://www.fiberoptic.com/Fiber_Characterization/pdf/fom_field_testing_pmd.pdf).
- [8] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. : il. (převážně barev.) ; 21 cm. ISBN 9788086534213.
- [9] KONDAMURI, Pradeep Kumar. *Characterization of polarizationmode dispersion and buried standard single-mode fibers* [online]. Sri Venkateswara University, Tirupathi, India, 2000 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z:<http://bit.ly/11jJREn>.
- [10] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2006 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z:<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>.
- [11] SEWTER, Jonathan. *Electronic equalization of polarization-mode dispersion in 40-GB/s optical systems*. [online]. Graduate Department of Electrical and Computer Engineering University of Toronto, 2005 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z:[http://www.eecg.utoronto.ca/~tcc/js\\_thesis\\_final\\_dup.pdf](http://www.eecg.utoronto.ca/~tcc/js_thesis_final_dup.pdf).

- [12] Profiber. *PROFiber Networking CZ s.r.o.* [online]. [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/>.
- [13] LECOEUICHE, Vincent, Gabriel JAGOT a Gregory LIETAERT. *Testing Polarization Mode Dispersion on Aerial Cables* [online]. Test & Measurement Regional Sales, 2010 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://bit.ly/1RNZNu1>.
- [14] R. LEFEBVRE, PH.D, Kevin. *Environmental Effects on Chromatic and Polarization Mode Dispersion* [online]. NETTEST [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://bit.ly/1QGvtz8>.
- [15] TEC controller. *QUIC-OHM, Component-Heat Management - High Tech Ceramic* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://bit.ly/1NEViUA>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BER	přenosová bitová chybovost – Bit Error Rate
CSV	hodnoty oddělené čárkou – Comma-separated values
DGD	diferenciální skupinové zpoždění – Differential Group Delay
$v_f$	fázová rychlost
FEC	dopředná chybová korekce – Forward error correction
GINTY	Obecná interferometrická metoda měření PMD
HTML	hypertextový jazyk – Hyper Text Markup Language
ITU-T	mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
$\Delta\tau_c$	koeficient PMD
$T_B$	bitová délka – bit lenght
$l$	délka vlákna
LED	dioda se světelnou emisí – Light Emitting Diode
LMS	typ adaptibilního algoritmu – Least Mean Square
$\Delta\tau$	maximální PMD zpoždění
NRZ	kódování bez návratu k nule – Non Return to Zero
PBS	polarizační dělič paprsku – Polarizing Beam Splitter
PMD	polarizační vidová disperze – Polarization mode dispersion
PMF	vlákno s identickou polarizací – Polarization-maintaining fiber
P-OTDR	polarizační a optický reflektometr v časové oblasti – Polarization Optical Time Domain Reflectometer
PSP	základní stavy polarizace – Principal States of Polarization
$v_s$	skupinová rychlost
SNR	odstup signál-šum – Signal-to-noise ratio
SOP	změna stavu polarizace – State of Polarization



TIA	fotodioda s transimpedančním zesilovačem – Photodiode-transimpedance amplifier
TINTY	tradiční interferometrická metoda měření PMD
$\omega$	úhlová optická frekvence
$\lambda$	vlnová délka
WDM	vlnový multiplex – Wavelength Division Multiplex

# SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého DVD

66

## A OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

Přiložené DVD obsahuje všechny důležité soubory bakalářské práce. Můžeme zde nalézt elektronickou verzi bakalářské práce, která se nachází ve složce Bakalářská práce. Obsaženy jsou zde dvě složky s náměry, jedna z venkovního měření a druhá z měření v teplotní komoře. Další částí je složka s názvem MATLAB, ve které jsou obsaženy soubory se skripty pro vykreslování grafů. V této složce jsou obsaženy i jednotlivé náměry, aby mohly být načteny. Hlavní spustitelný soubor pro se nazývá MATLAB. Grafy vykreslené pomocí MATLABu můžeme najít ve složce Výsledné grafy.